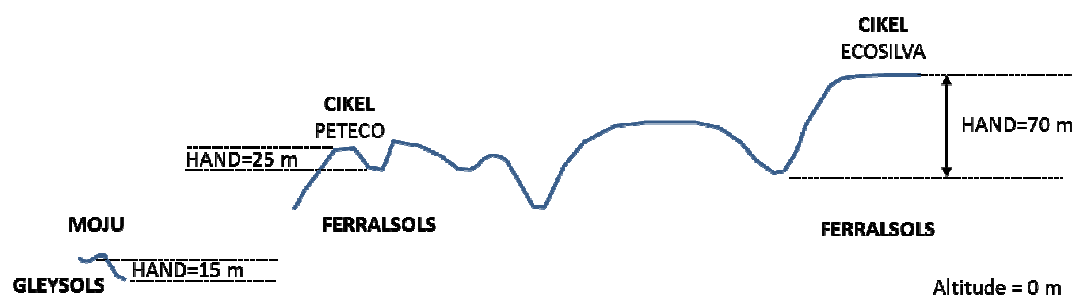


## Appui en pédologie pour le projet TmFO Sites La Cikel et Moju (Para, Brésil) 4 au 14 novembre 2013



Vincent Freycon  
13 juin 2014

## RESUME

L'objectif de cette étude était de caractériser les sols des dispositifs de La Cikel (Ecosilva, Peteco) et de Moju, deux sites d'Amazonie (Para, Brésil) qui font partie du réseau Tropical managed Forest Observatory (TmFO) (Fig. 1). Ces deux sites se trouvent sur des plateaux sédimentaires du tertiaire (Fig. 2). Nous avons effectué 22 sondages tarière pour estimer la variabilité spatiale des sols et décrit 3 profils de sol représentatifs de ces deux sites. Nous avons prélevé des échantillons de sols pour des analyses physico-chimiques qui permettront de valider les observations de terrain et de classer les sols dans le système international WRB. Les sols de La Cikel sont a priori des Ferralsols, argileux, « jaune » (10YR), sans taches, sans éléments grossiers et très compact en profondeur, ce qui peut limiter l'enracinement (Fig. 11). Ces sols sont globalement très homogènes. Les termitières, qui forment des buttes en forêt, devraient modifier localement les propriétés de ces sols et conduire à la présence de micro-habitats (Fig. 8). Les sols de Moju sont principalement des Gleysols, sableux, de couleur grise, jaune pale ou olive (2.5Y), souvent avec des taches, illustrant des conditions hydromorphes (Fig. 16, Fig. 17). En bordure du plateau et du dispositif, se trouvent certainement des Acrisols. Les sols de Moju sont organisés suivant un gradient d'hydromorphie qui dépend d'une légère dépression au sein du plateau. Cette dépression correspond au tracé d'une rivière temporaire (Fig. 18). Cette organisation est similaire à celle observée sur les sédiments tertiaires du bassin supérieur de l'Amazonie (Rondonia, Brésil) (Fig. 19). En conclusion, les sols de La Cikel et de Moju sont différents, respectivement des Ferralsols et des Gleysols, ce qui devrait conduire à des dynamiques forestières différentes (Tab. 1). Le dénivelé par rapport au niveau de base, estimé par le critère HAND (Height Above Nearest Drainage), pourrait être un critère pertinent pour prédire l'organisation de ces sols (Fig. 20).

## SUMMARY

The aim of this study was to characterize the soils of Cikel (Ecosilva, Peteco) and Moju, two Amazonian sites (Para, Brazil) that are part of the Tropical managed Forest Observatory (TmFO) (Fig. 1). Both sites are on tertiary sedimentary plateaus (Fig. 2). We bored 22 soil cores using an auger to estimate soil spatial variability, and described three soil profiles representative of the two sites. We collected soil samples for physical and chemical analyses so as to validate field observations, and to classify soil profiles using the World Reference Base for Soil Resources. Cikel soils were presumably Ferralsols. They were clayey, yellow (hue of 10YR), without mottles or rock fragments, and very compact with depth, which may limit rooting depth (Fig. 11). These soils were very homogeneous at mesoscale. But termite mounds, which were common at Cikel, might change soil properties at local scale and induce soil microhabitat heterogeneity (Fig. 8). Moju soils were mainly Gleysols, sandy, grey or pale yellow (hue of 2.5Y), and often mottled because of hydromorphic conditions (Fig. 16, Fig. 17). Acrisols were most probably on the edge of the plateau and of the experimental plots. Moju soils followed a hydromorphic gradient because of a slight depression in the plateau, which corresponded to a temporary river (Fig. 18). This hydromorphic gradient was similar to that observed in the tertiary sediments of the upper Amazon basin (Rondonia, Brazil) (Fig. 19). In conclusion, Cikel and Moju soils were different, i.e. Ferralsols and Gleysols, respectively. They should lead to different forest dynamics (Tab. 1). The Height Above Nearest Drainage (HAND) index may be a relevant criterion to predict the spatial distribution of these soils at mesoscale (Fig. 20).

## CONTEXTE, OBJECTIF

Le projet Tropical managed Forest Observatory (TmFO) est un observatoire des forêts exploitées dont les principales questions de recherche en écologie sont les suivantes (i) les forêts tropicales sont-elles résilientes aux perturbations dues à l'exploitation forestière (ii) Les réponses des forêts varient-elles en fonction des régions et des continents ?

Pour répondre à ces questions un observatoire de forêts exploitées a été mis en place dans différents sites d'Amazonie et d'Asie. En Amazonie, 13 sites ont été retenus (Fig. 1).

Les sols de certains de ces sites sont peu renseignés. Or, les caractéristiques de ces sols devraient certainement avoir une influence sur la dynamique de la forêt après exploitation (Baker et al. 2003, Baraloto & Goldberg 2006, Paoli & Curran 2007).

Nous avons apporté un appui en pédologie au projet TmFO, d'une part, pour caractériser les sols de deux sites - La Cikel (**Chapitre 1**), Moju (**Chapitre 2**) – et les comparer (**Chapitre 3**) et, d'autre part, pour réfléchir au protocole d'analyse de sols qui devra être appliqué sur l'ensemble des sites du projet TmFO (**Chapitre 4**). Cet appui a été réalisé lors d'une mission au Brésil effectuée du 4 au 14 novembre 2013. Il a été financé par le projet TmFO. L'objectif de cette note est de restituer une synthèse de cet appui. Nous avons aussi restitué les discussions que nous avons eues avec R. Pocard (Cirad Belem, Umr Selmet) lors de notre mission sur différents sujets (**Chapitre 5**).

Nous remercions Lucas Mazzei de Freitas (Embrapa Belem) et Lilian Blanc (Cirad Belem, UR Bsef) pour l'organisation logistique qui a permis d'effectuer le terrain dans de très bonnes conditions. Nous remercions la compagnie de La Cikel et l'Embrapa de Belem pour nous avoir accueilli sur leurs sites et mis à disposition un logement. Merci aussi à Lucas Mazzei de Freitas, Fabiano de Carvalho Balieiro (Embrapa, Rio de Janeiro), Fernando Viera Cesario (Thésard, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro) et Lilian Blanc pour la richesse des discussions scientifiques qui ont eu lieu sur le terrain. Enfin, merci à Fabiano de Carvalho Balieiro pour son esprit astucieux pour réparer une tarière cassée, à Bruno Ferry pour son éclairage sur les analyses de sol à appliquer dans le projet TmFO, à Marie-Cécile Maraval pour la correction du résumé en anglais, et à Nicolas Fauvet pour avoir réalisé les cartes sous ArcGis.



Cette étude sera poursuivie par une autre mission de terrain en novembre 2014 à Jari et Dois Mil Madeireira, deux autres sites d'Amazonie du réseau TmFO.



Figure 1 : Localisation des 13 sites du projet TmFO en Amazonie  
 Tiré du site : <http://www.tmfo.org/>



## Chapitre 1 : CARACTERISATION DES SOLS DE LA CIKEL

### MATERIEL & METHODES

#### Sites d'étude

Le site de la Cikel se trouve dans l'état du Para, dans le Municipipe du Paragominas, à 250 km au sud de Belém, à proximité de la PA-150 qui relie Belém à Marabá. Il se trouve au sein de la Fazenda Rio Capim qui est détenue par le groupe CIKEL-Brésil.

Ce site se trouve sur des terrasses sédimentaires du tertiaire. La topographie générale est plane avec de légères ondulations. L'unité géomorphologique correspond au plateau des rivières Gurupu et Grajau (Fig. 2). L'altitude moyenne est de 20 m (Sist & Ferreira 2007) mais les dispositifs Ecosilva et Peteco du projet TmFO se trouvent respectivement à une altitude moyenne de 170 m et de 120 m (Fig. 3, Fig. 4). Les précipitations annuelles moyennes sont de 1800 mm. D'après la carte mondiale des sols (Verelst 2009), ce site est occupé majoritairement par des Xanthic Ferralsols et par des Plinthic Acrisols. D'après la carte des sols du Brésil, le dispositif d'Ecosilva se trouve sur une association de Latossolos Amarelos et de Plinthossolos petricos, tandis que celui de Peteco se trouve seulement sur des Latossolos Amarelos (Fig. 5).

Une exploitation forestière à faible impact (Reduced impact-logging, RIL, Sist & Ferreira 2007) a eu lieu en 2004. Des parcelles témoin (= non touchées par l'exploitation forestière) et des parcelles de suivi de la forêt après exploitation ont été installées : 18 parcelles de 1 ha (= 100 m x 100 m) à La Cikel-Ecosilva et 36 parcelles de 0,25 ha (= 50 m x 50 m) à la Cikel-Peteco.

#### Prospection tarière

Dans un premier temps, nous avons effectué 12 sondages tarière (6 à Ecosilva et 6 à Peteco ; Fig. 6, Fig. 7) au maximum jusqu'à 1 m de profondeur, pour avoir un aperçu de la variabilité verticale et de l'organisation spatiale des sols. Cette phase de prospection à la tarière nous a conduit à définir un seul sol de référence.

#### Ouverture d'une fosse

Une fosse a été ouverte jusqu'à une profondeur de 1m30, qui nous a permis de décrire un profil de sol de référence. Ce profil a été découpé en 5 horizons. Nous avons prélevé un échantillon représentatif de chaque horizon (total : 5 échantillons), en vue d'analyses physico-chimiques qui seront réalisées par le laboratoire du Cirad à Montpellier (Annexe 7). La description de ce profil sur le terrain et les résultats des analyses permettront de rattacher ce profil à la classification internationale des sols (IUSS Working Group WRB 2006). Nous avons aussi prélevé avec un cylindre 5 échantillons de sol afin de mesurer la densité apparente (Annexe 7).

#### Protocole Guyafor

Sur le dispositif Ecosilva, nous avons prélevé à la tarière 3 échantillons de sol composites de surface 0-20 cm en suivant le protocole du réseau Guyafor (Annexe 7). Un échantillon composite est composé d'un mélange de 10 prélèvements élémentaires qui sont effectués sur un rectangle de 40 m x 10 m. Deux échantillons composites, Ecosilva-1 et Ecosilva-2, ont été prélevés en partant du transect B, tandis que le troisième échantillon composite a été prélevé à partir du transect A. Ces 3 échantillons seront analysés dans le laboratoire du Cirad (Montpellier). L'échantillon Ecosilva-1 a été séparé en deux sous-échantillons afin de pouvoir être analysé dans deux laboratoires différents (Cirad vs Embrapa) (Annexe 7).

## RESULTATS

### Des micro-modelés témoins de la présence de termitières

La topographie du site de La Cikel est globalement plane. Par contre, localement on observe des micro-modelés, plus précisément des buttes circulaires de 0,5 à 1 m de haut et d'un diamètre de 5 à 10 m (Fig. 8). Ces micro-modelés correspondent à des termitières, en général encore actives.

Ces micro-modelés sont-ils rares ou fréquents en forêt ? En parcourant la forêt, on peut penser qu'ils sont rares. Mais cette perception est certainement biaisée à cause d'une visibilité faible en forêt. En effet, nous avons observé que ces micro-modelés sont fréquents le long de la route PA-150, dans des zones anciennement occupées par la forêt et aujourd'hui déforestées, là où la visibilité est bonne, à environ 30 km au nord-ouest du dispositif Peteco (Fig. 3, Fig. 9).

### Des sols homogènes

Sur les 12 sondages tarière, nous avons observé des sols homogènes (Fig. 10, Annexe 2). Le profil type d'un sol d'Ecosilva est le suivant : texture argileuse, couleur passant progressivement de brun jaune (10YR5/4) en surface [0-10 cm] à jaune rouge (7.5YR6/6) à 100 cm de profondeur, absence de taches, absence d'éléments grossiers, sol humide en surface et sec et très compact en profondeur.

Le profil type d'un sol de Peteco est très similaire à celui d'Ecosilva. Nous avons juste observé comme seule différence mineure un sol qui est davantage humide en profondeur.

### Un sol de référence à rattacher probablement à un Xanthic Ferralsol

Le sol de référence de La Cikel correspond au profil Cikel-Ecosilva (Fig. 11) qui est décrit précisément dans l'Annexe 3. Sa description synthétique est la suivante. Ce profil a sur toute sa profondeur une texture argileuse. Nous n'avons observé ni taches, ni éléments grossiers. Sa couleur passe progressivement de brun jaune sombre (10YR4/4) en surface [0-5 cm] à jaune rouge (7.5YR6/8) à 130 cm de profondeur. Les racines sont nombreuses jusqu'à 85 cm, les grosses racines étant présentes seulement au-dessus de 40 cm. En-dessous de 85 cm, les racines sont peu nombreuses. Cela coïncide avec la présence d'un horizon sec et très compact. Des traces d'activités de termites ont été observées (galeries, terre durcie, termites vivants). Nous avons observé à partir de 40 cm une structure micro-agrégée typique d'un horizon ferralique mais modérée, à cause certainement d'un sol sec.

Ces observations nous conduisent à rattacher ce profil à un Xanthic Ferralsol, le Ferralsol étant dû à la présence d'un horizon ferralique, et la propriété xanthic étant due à la couleur « jaune » (Hue = 7.5YR ou 10YR ; Value  $\geq$  4, Chroma  $\geq$  4) de cet horizon ferralique. Ce rattachement devra être confirmé par les analyses physico-chimiques. Nous vérifierons notamment l'absence d'un horizon d'accumulation d'argile.

## DISCUSSION

Les dispositifs Ecosilva et Peteco de La Cikel se trouvent sur un plateau de moyenne altitude (respectivement 170 et 120 m), globalement plat, mais marqué par un micro-modelé de termitières.

Les sols de ces deux dispositifs sont similaires, très homogènes et devraient être des Xanthic Ferralsols. Sur le dispositif de Peteco, ce type de sol est conforme avec la carte des sols du Brésil. Par contre, sur le dispositif d'Ecosilva, nous aurions dû trouver une association de Xanthic Ferralsol et de Plinthosols. Nous suggérons que ces Plinthosols ne sont pas présents sur le dispositif d'Ecosilva, puisque dans le premier mètre de profondeur, nous n'avons observé aucun caractère (ex. hydromorphie, nodules ferrugineux, ...) qui annonce un horizon plinthique, pétroplinthique ou pisolitique, caractéristiques des Plinthosols.

Les sols de ces deux dispositifs sont très homogènes certainement à cause de la topographie homogène (plateau) et de la présence de nombreuses termitières. En effet, il est connu que les termites, en brassant la terre homogénéisent le sol. Les termites seraient aussi à l'origine de la structure micro-agrégée typique des Ferralsols (Eschenbrenner 1986, Schaefer 2001, Reatto et al. 2009).

Les sols d'Ecosilva et de Peteco ont des propriétés favorables pour le développement de la végétation. Ils ont certainement un bon drainage, vue leur structure qui leur confère une bonne porosité, leur couleur (« jaune » 10YR, témoin de la goethite, un oxyde de fer en équilibre avec un milieu oxygéné) et l'absence de taches. Par contre, ils présentent aussi probablement les contraintes suivantes : fertilité chimique globalement faible, réserve en eau insuffisante en saison sèche surtout si leur enracinement ne peut pas se développer en profondeur à cause de la présence d'un horizon très compact.

Localement, les propriétés des sols qui ont été travaillés au sein des termitières devraient être meilleures que celles des sols adjacents non influencés par les termites : augmentation du pH, de la teneur en argile, de la CEC, du phosphore, de la teneur en eau (Bachelier 1977, Donovan et al. 2001, Roose-Amsaleg et al. 2005, Brossard et al. 2007, Abe et al. 2009, Sarcinelli et al. 2009, 2013). L'action des termites pourrait alors créer des micro-habitats dans la forêt tropicale (Donovan et al. 2001) favorisant l'enracinement des arbres (Lu et al. 2013) et plus généralement structurant la diversité et la répartition spatiale des espèces (Beaudrot et al. 2013, Yamashina 2013). Notons que l'exploitation forestière peut aussi modifier la répartition de ces termitières (Donovan et al. 2007). Une synthèse bibliographique plus complète permettrait certainement de définir un sujet original qui pourrait être démarré lors d'un stage de master. Ce sujet devrait être facile à justifier, puisque, jusqu'à présent, les relations termitières-sols-végétation ont été étudiées principalement en savane et plus rarement en forêt tropicale humide.

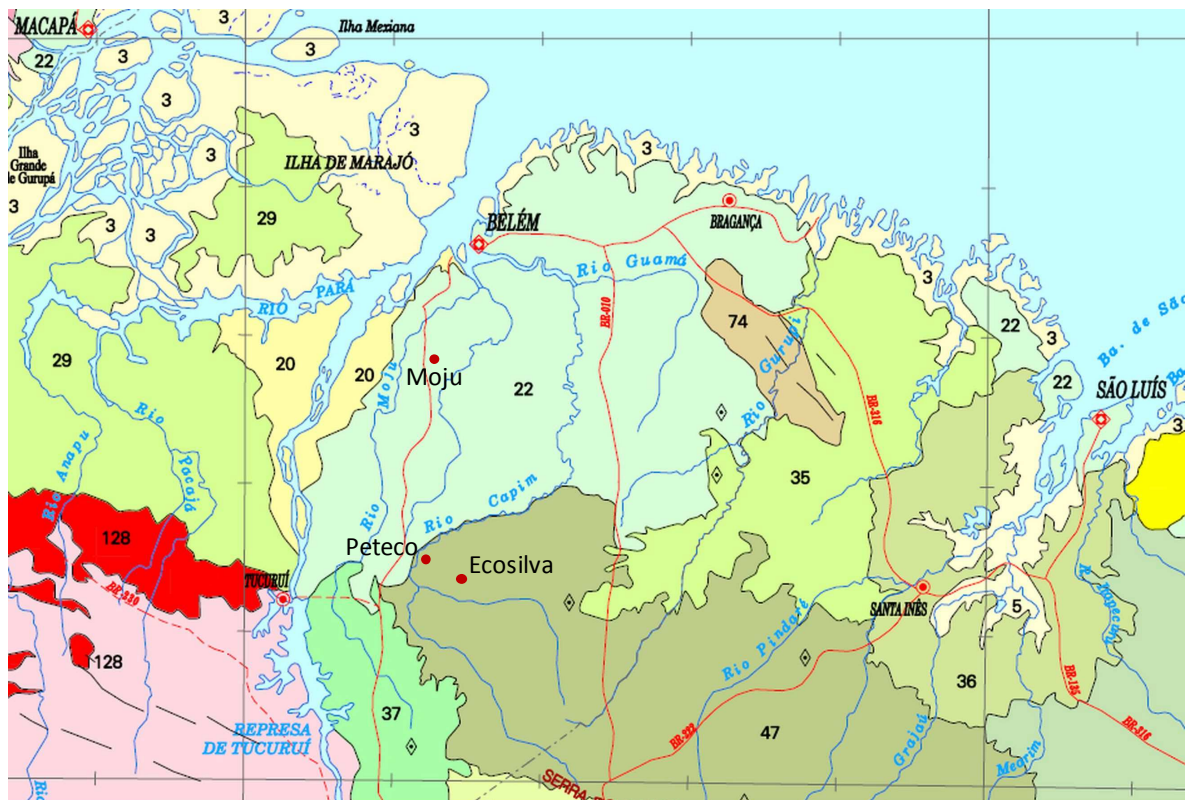


Figure 2 : Localisation des sites de La Cikel (dispositifs Ecosilva et Peteco) et de Moju sur un extrait de la carte géomorphologique du Brésil (2006). L'unité 22 correspond à des plateaux côtiers. L'unité 47 correspond aux plateaux des rivières Gurupi et Grajaú.

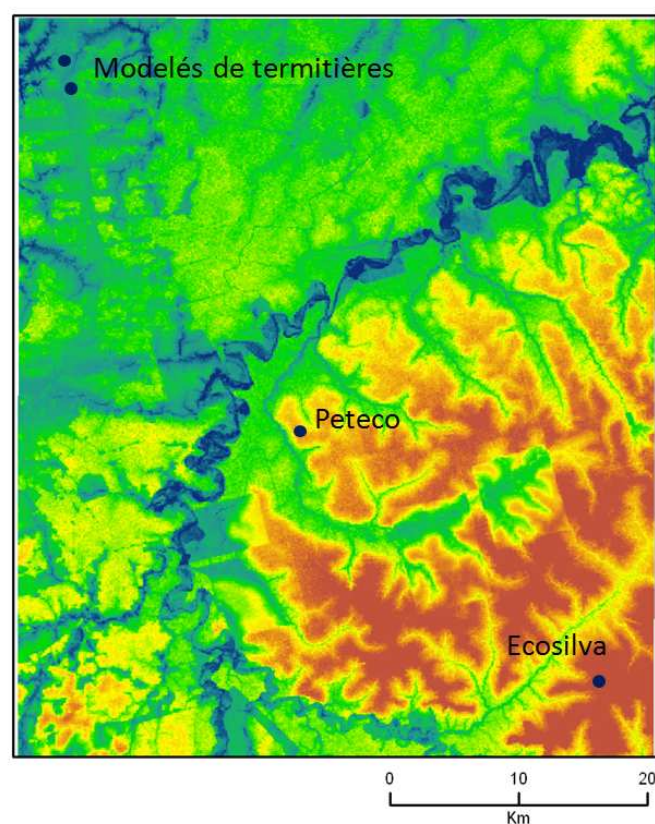


Figure 3 : Localisation du site de La Cikel (dispositifs Ecosilva et de Peteco) et des modelés de termitières (voir Fig. 9) sur une image SRTM à 90 m de résolution. La gamme des altitudes varie entre 28 m (bleu) et 174 m (orange).



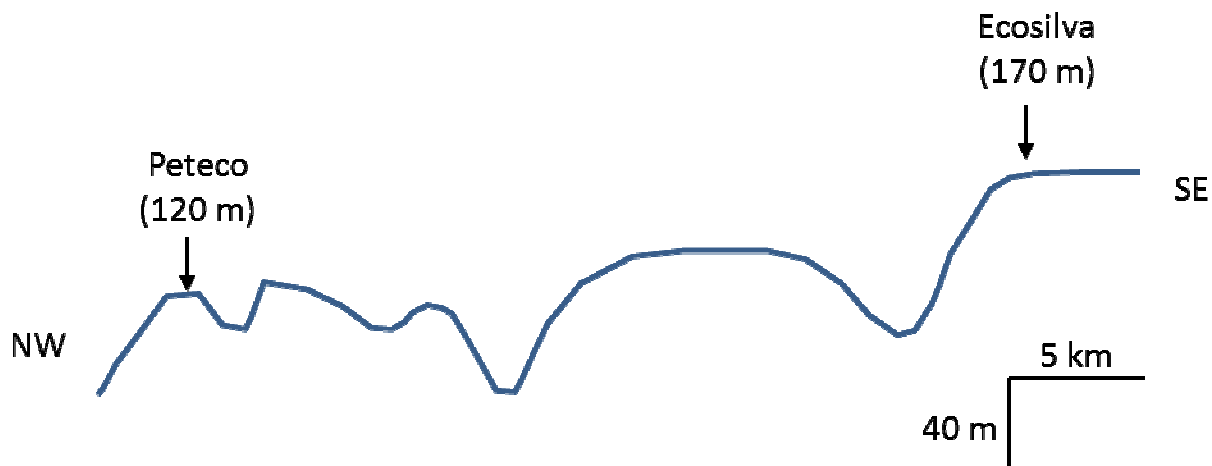


Figure 4 : Coupe topographique schématique d'un transect qui relie Ecosilva et Peteco



Figure 5 : Localisation des sites de La Cikel (dispositifs Ecosilva et Peteco) et de Moju sur un extrait de la carte des sols du Brésil. LA1= Latossolos amarelos ; LA10= Latossolos amarelos distrofico + Plinthossolos petricos concrecionario distrofico. Le sigle « + » signifie que le sol dominant est de texture « media » (au contraire d' « arenosa »)

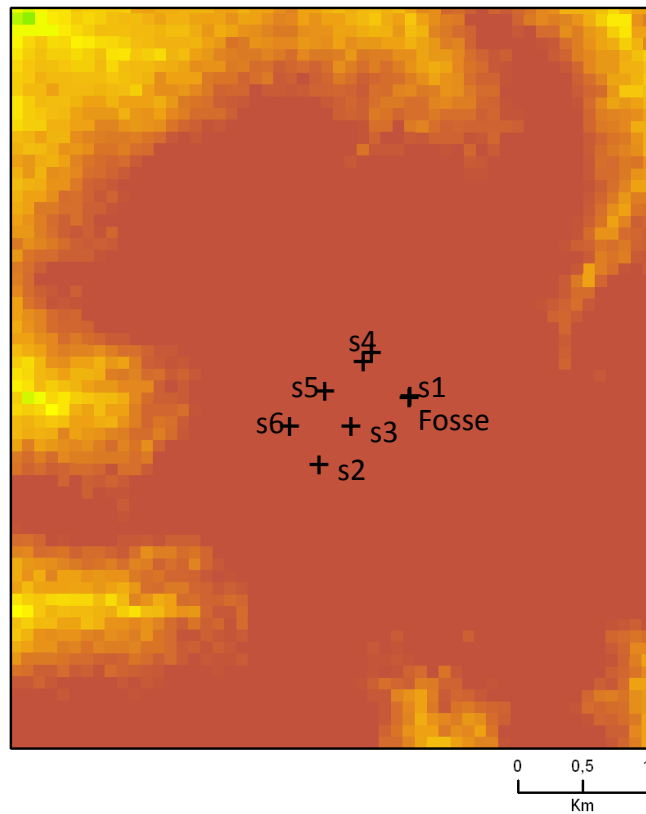


Figure 6 : Localisation des sondages tarière et de la fosse sur le site de la Cikel-Ecosilva.  
Le fond SRTM correspond à celui de la Figure 3.

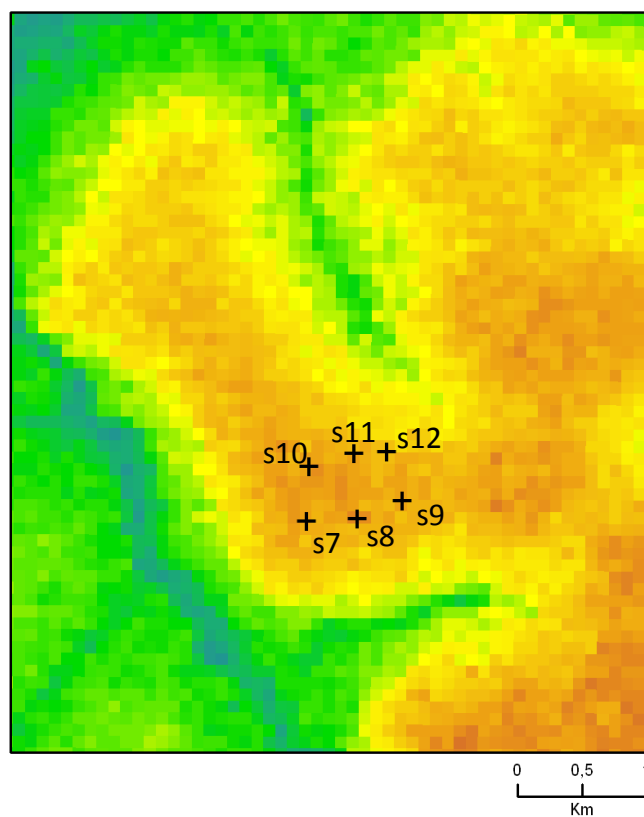


Figure 7 : Localisation des sondages tarière sur le site de la Cikel-Peteco  
Le fond SRTM correspond à celui de la Figure 3



Figure 8 : Micro-modelé dans la forêt de la Cikel, correspondant à une termitière



Figure 9 : Micro-modelés de termitières dans une zone déforestée, le long de la route PA-150 entre Belém et Marabá (Voir leur localisation sur la Fig. 3). Photo : L. Blanc



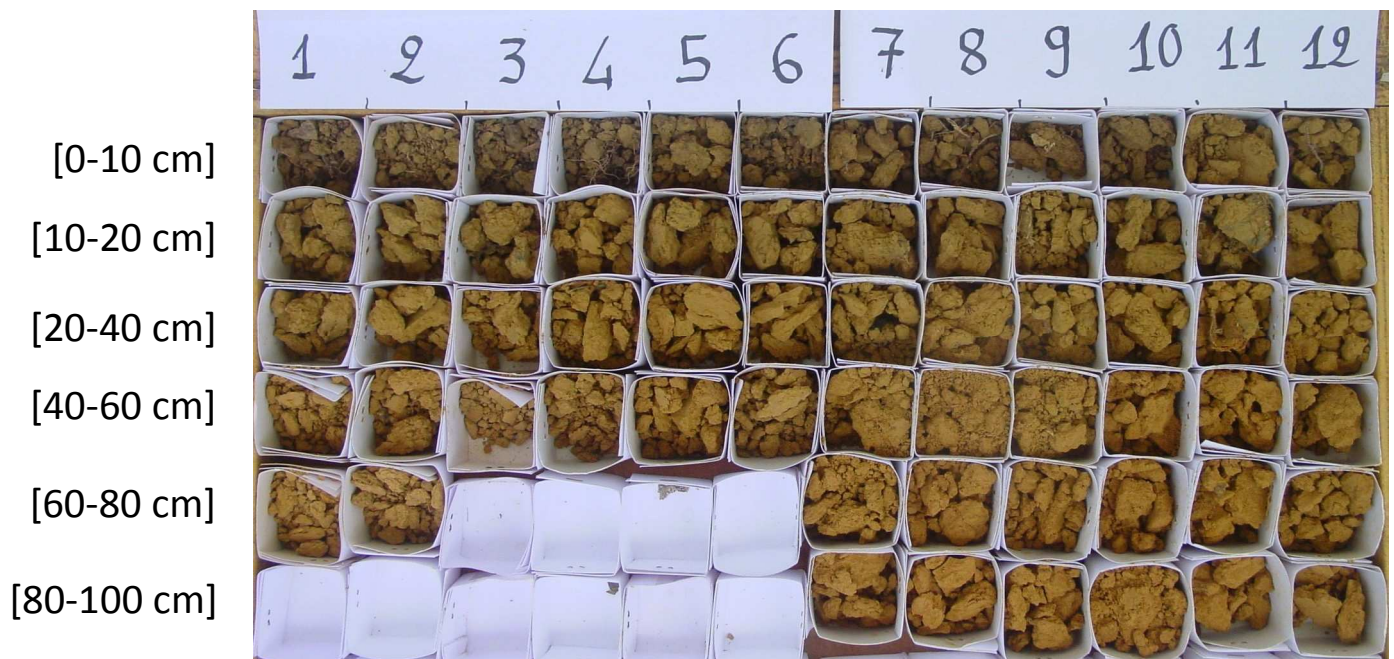


Figure 10 : Sondages tarière prélevés à la Cikel, sur les dispositifs d'Ecosilva (1 à 6) et de Peteco (7 à 12). Les couleurs (Munsell soil color chart) sont données dans l'Annexe 2.



Figure 11 : Profil de sol La Cikel-Ecosilva ((description détaillée dans l'Annexe 3)

## **Chapitre 2 : CARACTERISATION DES SOLS DE MOJU**

### **MATERIEL & METHODES**

#### **Sites d'étude**

Le site de Moju se trouve dans l'état du Para, dans le Municipipe de Moju, à 100 km au sud de Belém, au bord de la PA-475 qui relie Belém à Marabá. Le site de Moju est géré par l'EMBRAPA Belém.

Ce site se trouve sur des terrasses sédimentaires du tertiaire. La topographie générale est plane. L'unité géomorphologique correspond au plateau côtier (Fig. 2). L'altitude moyenne est de 35 m (Fig. 12). Les précipitations annuelles moyennes sont de 2400 mm. D'après la carte mondiale des sols (Verelst 2009), ce site est occupé majoritairement par des Xanthic Ferralsols et par des Plinthic Acrisols. D'après la carte des sols du Brésil, ce site se trouve sur des Latossolos Amarelos (Fig. 5).

Une exploitation forestière a eu lieu en 1997. Vingt-deux parcelles de 0,5 ha (= 100 m x 50 m) de suivi de la forêt après exploitation ont été installées.

#### **Prospection tarière**

Dans un premier temps, nous avons effectué 10 sondages tarière jusqu'à 1 m de profondeur pour avoir un aperçu de la variabilité verticale et de l'organisation spatiale des sols (Fig. 13). Cette phase de prospection nous a conduit à définir deux sols de référence sur ce site.

#### **Ouverture de deux fosses**

Deux fosses ont été ouvertes jusqu'à une profondeur de 1,20 m ou 1,30 m. qui nous ont permis de décrire deux profils de sol. Dans chaque fosse, nous avons prélevé un échantillon représentatif de chaque horizon. Au total, 10 échantillons ont été prélevés, en vue d'analyses physico-chimiques qui seront réalisées par le laboratoire du Cirad à Montpellier (Annexe 7). La description de ces profils sur le terrain et les résultats des analyses permettront de rattacher ces profils à la classification internationale des sols (IUSS Working Group WRB 2006). Nous avons aussi prélevé avec un cylindre 10 échantillons de sol afin de mesurer la densité apparente du sol au sein de ces deux profils (Annexe 7).

#### **Protocole Guyafor**

Sur la parcelle P14, nous avons prélevé à la tarière 1 échantillon de sol composite de surface 0-20 cm en suivant le protocole du réseau Guyafor (Annexe 7). Cet échantillon composite, Moju-2, a été séparé en deux sous-échantillons afin de pouvoir être analysé dans deux laboratoires différents (Cirad vs Embrapa) (Annexe 7).

### **RESULTATS**

#### **Un plateau traversé par une rivière temporaire**

La topographie du site de Moju est globalement plane sous la forme d'un plateau d'environ 35 m d'altitude. Par contre, notre prospection sur le terrain nous a permis de détecter une légère dépression qui traverse ce plateau dans son grand axe (Fig. 13, Fig. 14). Cette dépression a les caractéristiques d'un lit de rivière temporaire : dépression linéaire de 2 à 4 m de large, parfois ayant la forme de méandres et bordée par des talus. Nous avons suivi ce lit de rivière sur environ 1 km en forêt. Son orientation est nord-est de part et d'autre de la piste principale puis bifurque au nord, ce qui suggère qu'elle rejoint 1 km plus loin une rivière bien visible sur l'image SRTM (Fig. 13).



De plus, dans quelques parcelles (P12, P14), nous avons observé dans un relief globalement plat, des rigoles qui correspondent certainement à un réseau de ruisseaux actifs en saison des pluies.

Enfin, nous avons observé en de rares occasions un micro-modelé lié à des termitières (ex. P21).

### **Des sols avec un gradient d'hydromorphie**

Les 10 sondages tarière effectués à Moju présentent les caractéristiques communes suivantes : texture sableuse en surface [0-10 cm], puis sablo-argileuse et à partir de 40 cm argilo-sableuse, couleur essentiellement 2.5Y (Fig. 15, Annexe 2), absence d'éléments grossiers, sol frais en surface, humide vers 40 cm de profondeur puis de nouveau frais.

Ils se distinguent en deux groupes, un premier groupe dont les sols ne présentent pas de taches « rouilles » (s15, s17, s18), et un deuxième groupe dont les sols présentent des taches « rouille » d'oxydation (7.5YR6/8) plus ou moins marquées, généralement à partir de 40 cm de profondeur (s13, s14, s19, s20, s21, s22).

On peut aussi classer ces sol suivant un gradient de sol « délavé » (un sol est d'autant plus délavé que la valeur du chroma est faible) avec, aux deux extrêmes de ce gradient, s17 (chroma = 3 à 6) et s18, s16 (chroma=2) (Fig. 15, Annexe 2).

Nous avons choisi d'étudier deux profils de référence, le premier, Moju1, correspondant au sondage tarière s18 (sol le plus délavé et sans taches rouilles), le deuxième, Moju2, correspondant au sondage tarière s14 (taches rouilles).

### **Des sols de référence à rattacher probablement à des Acric Gleysols**

Les deux sols de référence de Moju correspondent aux profils Moju1 et Moju2 qui sont décrits précisément dans les Annexes 4 et 5.

Le profil Moju1 (Fig. 16) se trouve à 15 m de la rivière temporaire. Il a une couleur « grise » (2.5Y), une des couleurs caractéristique des Gleysols. Sa texture varie avec la profondeur (Sableux puis sablo-argileux puis argilo-sableux), ce qui suggère une accumulation d'argile à mi-profondeur et par conséquent la présence d'un horizon argique. Ces observations nous conduisent à rattacher ce sol à un Acric Gleysol.

Le profil Moju2 (Fig. 17) a une couleur qui varie (brun olive clair, jaune pale, ...), mais qui reste dans le Hue 2.5Y, une des couleurs caractéristique des Gleysols. Il présente de nombreuses taches jaunes (10YR) à partir de 35 cm de profondeur. Sa texture varie avec la profondeur, ce qui suggère une accumulation d'argile et la présence d'un horizon argique. Ces observations nous conduisent à rattacher aussi ce sol à un Acric Gleysol.

## **DISCUSSION**

Le site de Moju se situe sur un plateau allongé de basse altitude (moyenne 35 m), caractérisé le long de son grand axe par une légère dépression qui correspond à une rivière temporaire. Fritsch et al. (2007) ont aussi observé dans le bassin Amazonien Supérieur (Rondônia) des rivières temporaires qui se trouvent au sein de plateaux de sédiments du Tertiaire. Ces auteurs suggèrent que ces rivières temporaires correspondent à l'ancien réseau de rivières qui existait avant le soulèvement des Andes.

Les sols trouvés à Moju sont des Acrisols et des Gleysols. Nous n'avons donc pas trouvé de Xanthic Ferralsols ou Latossolos Amarelos, les sols que l'on aurait dû trouver d'après respectivement la carte mondiale des sols et la carte des sols du Brésil. Cette différence entre nos observations (Gleysol) et le sol attendu (Ferrasol) provient très certainement de la petite échelle des cartes des sols, qui n'est pas assez précise par rapport nos observations.

Nos observations suggèrent que les sols s'organisent en fonction du modelé du plateau. En bordure du plateau, les sols ne sont pas marqués par l'hydromorphie (ex. sondage tarière s17) et correspondent à des Acrisols. En se rapprochant du grand axe central de ce plateau qui est marqué par une dépression, les sols sont de plus en plus marqués par l'hydromorphie et correspondent à des Gleysols (Fig. 18) auxquels appartiennent les profils Moju1 et Moju2. Le long d'un transect de 100 m de long, Fritsch et al. (2007) avaient observé une transition de sols allant des Acrisols à des Plinthosols puis à des Gleysols (Fig. 19). Cette différence d'organisation des sols entre notre étude à Moju (Acrisol-Gleysol) et celle de Fritsch et al. (2007) (Acrisol-Plinthosol-Gleysol) suggère (i) que des Plinthosols existent sur le site de Moju mais nous ne les avons pas mis en évidence à cause d'un échantillonnage trop faible et/ou pas assez profond (ii) ou que ces Plinthosols ne sont pas présents sur le site de Moju. Une étude complémentaire devrait permettre de trancher entre ces deux hypothèses et de valider l'organisation des sols de Moju.

Enfin, au sein des Gleysols, les deux profils de référence de Moju illustrent un gradient d'hydromorphie : l'hydromorphie est moins marquée pour Moju2 (sols moins délavés, chroma de 3 à 4, taches jaunes) tandis qu'elle est plus marquée pour Moju1 (sol plus délavé, chroma de 2). Ces deux profils, Moju2 et Moju1, sont similaires à deux variantes de Gleysols décrits par Fritsch et al. (2007), et qu'ils avaient nommés respectivement « transition soil » et « bleached soils ».

En conclusion, il serait intéressant d'observer ce site durant la saison des pluies. On pourrait alors valider que la dépression correspond bien à un cours d'eau qui est actif en saison des pluies et qui est connectée avec une rivière permanente. On pourrait aussi valider la présence d'un réseau de drainage au sein de quelques parcelles.

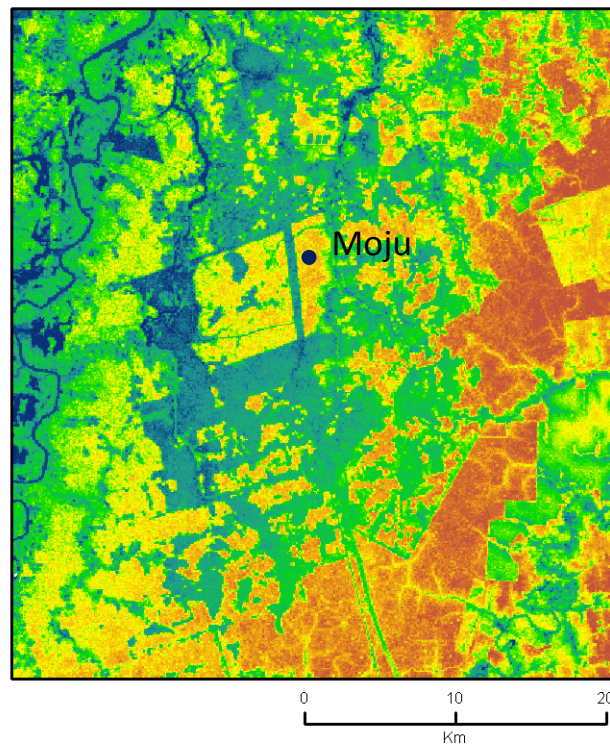


Figure 12 : Localisation du site de Moju sur une image SRTM à 90 m de résolution. La gamme des altitudes varie de 0 m (bleu) à 60 m (orange)

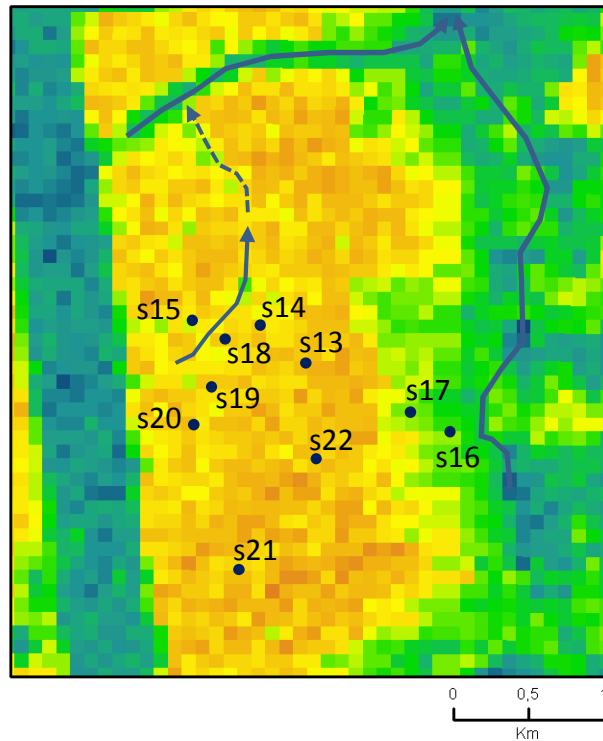


Figure 13 : Localisation des sondages tarière sur le site de Moju  
Le fonds SRTM correspond à celui de la Figure 12. La flèche pleine au sein du plateau correspond au tracé de la rivière temporaire. La flèche en pointillé correspond à son tracé supposé avant de rejoindre une rivière permanente.

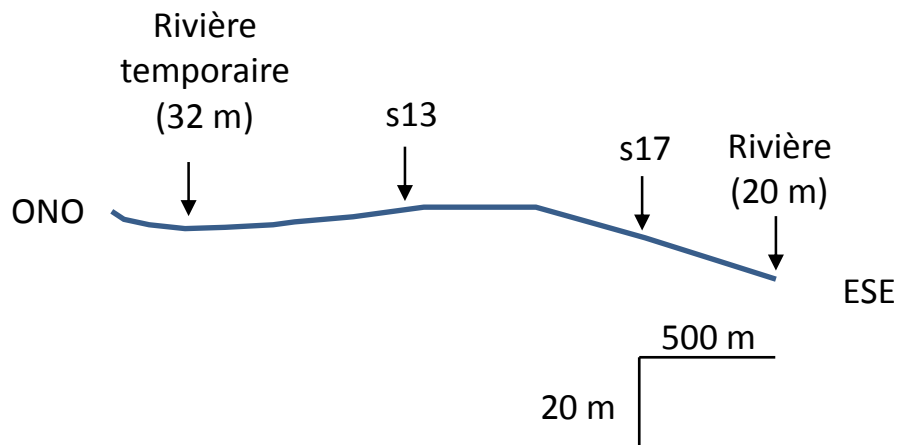


Figure 14 : Schéma d'une coupe topographique du plateau de Moju



Figure 15 : Sondages tarière prélevés à Moju (13 à 22). Les sondages sont ordonnés suivant la couleur : les sols sont de plus en plus pâles de la gauche vers la droite. Les couleurs (Munsell soil color chart) sont données dans l'Annexe 2.



Figure 16 : Profil de sol Moju1 (description détaillée dans l'Annexe 4)



Figure 17 : Profil de sol Moju2 (description détaillée dans l'Annexe 5)



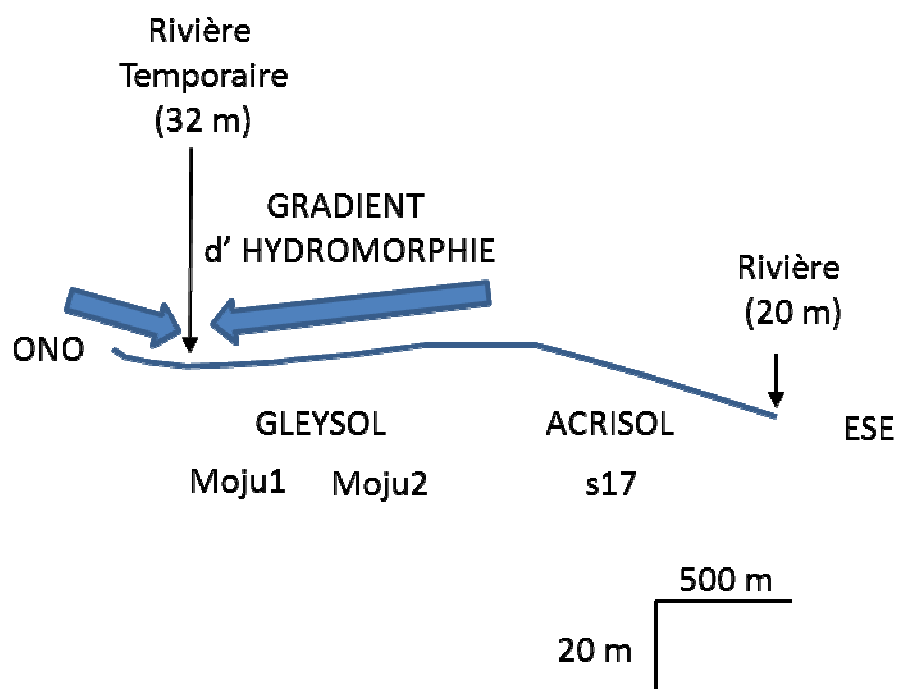


Figure 18 : Proposition d'un schéma d'organisation des sols à Moju

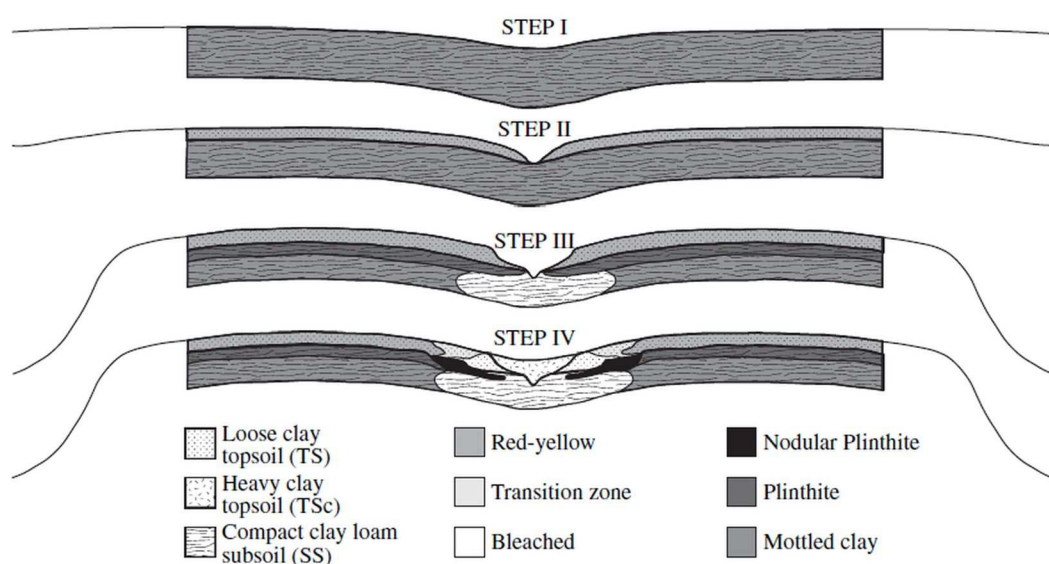


Figure 19 : Schéma de quatre étapes d'évolution des sols et du paysage proposé par Fritsch et al. (2007) dans le Bassin Amazonien supérieur. La 4<sup>ème</sup> et dernière étape correspond aux sols actuellement observés.

### **Chapitre 3 : COMPARAISON DES SOLS DE LA CIKEL ET DE MOJU**

#### **Des sols différents**

Les sols des dispositifs de La Cikel et de Moju sont différents, respectivement des Ferralsols et des Gleysols. Ces sols sont différents certainement à cause de différences de certains facteurs de la pédogénèse : géomorphologie (altitude, dénivelé par rapport au niveau de base local) biote (présence ou quasi-absence de termitières) et climat (Tab. 1).

#### **HAND, un critère synthétique pour prédire la répartition spatiale des sols ?**

Le niveau de base local (Filleron et al. 2003) peut être estimé par le critère « Height Above Nearest Drainage » (HAND, Renno et al. 2008, Nobre et al. 2011). Ce critère pertinent pour prédire le type de sol à une échelle intermédiaire « mesoscale » : des valeurs élevées (ex.  $\geq 25$  m à La Cikel) prédiraient des Ferralsols, tandis que des valeurs faibles (ex.  $\leq 15$  m à Moju) prédiraient des Gleysols et des Acrisols (Fig. 20). Une valeur seuil comprise entre 15 et 25 m prédirait alors la répartition spatiale des Ferralsols par rapport à des sols moins bien drainés (Acrisols, Gleysols). Cette valeur seuil est cohérente avec celle d'environ 20 m qui a été trouvée en Guyane française pour discriminer la répartition spatiale des Ferralsols et des Acrisols (projet Guyafor, projet Habitat, En cours de valorisation). Ce résultat doit être conforté par des études sur d'autres sites du projet TmFO.

#### **Conséquence pour la dynamique forestière**

La dynamique forestière devrait être différente sur ces deux types de sols de La Cikel et de Moju. Si on tient compte uniquement du sol, on s'attend à ce que la période la plus favorable pour la croissance soit, respectivement, en saison des pluies à La Cikel et en saison sèche à Moju (Tab. 1).

Tableau 1 : Facteurs environnementaux des sites de La Cikel et de Moju

| Facteur de l'environnement | La Cikel  | Moju  |
|----------------------------|---|---|
| Géologie                   | Sédiments du IIIaire  | Sédiments du IIIaire  |
| Géomorphologie             | Plateaux des rivières Gurupi et Grajau  | Plateaux côtiers  |
| Altitude                   | 170 m (Ecosilva)<br>120 m (Peteco)  | 35 m  |
| HAND*                      | 70 m (Ecosilva)<br>25 m (Peteco)  | 15 m  |
| Précipitations annuelles   | 1800 mm   | 2400 mm   |
| Termitières                | Fréquentes  | Rares   |
| Types de sols              | Xanthic <b>Ferralsols</b>   | Acric <b>Gleysols</b>   |
| Avantages                  | Bonne structure, porosité et oxygénation<br>Saison des pluies : bon drainage  | Saison sèche : Nappe d'eau peu profonde<br>Saison des pluies : Phosphore disponible en quantité non négligeable               |
| Contraintes                | Faible fertilité chimique<br>Saison sèche : Réserve en eau limitée<br>Enracinement profond gêné par sol argileux très compact | Faible fertilité chimique (sauf Phosphore disponible)<br>Saison des pluies : Eau en excès, hydromorphie, asphyxie des racines |

\*Height Above Nearest Drainage (Renno et al. 2008, Nobre et al. 2011)

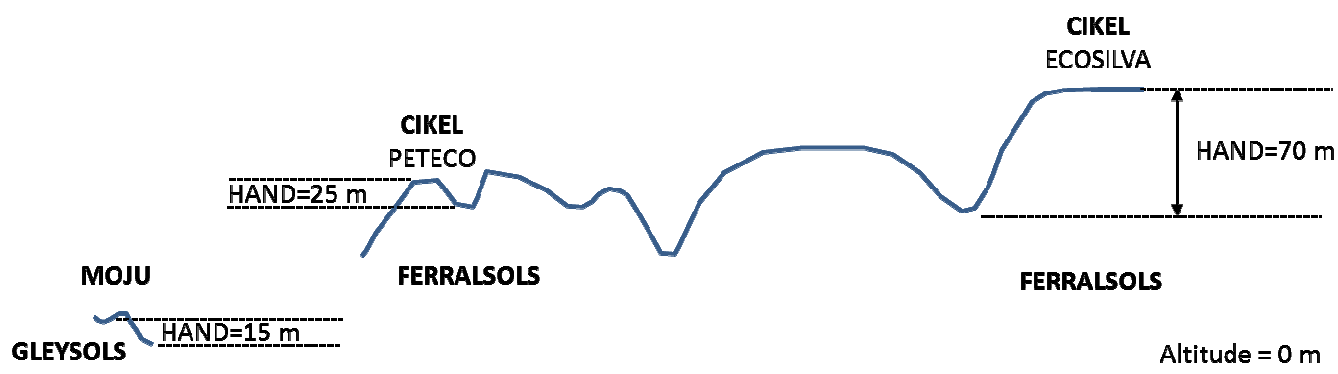


Figure 20 : Schéma récapitulatif d'organisation des sols de La Cikel et de Moju  
A Moju, le dispositif se trouve essentiellement sur des Gleysols En bordure du dispositif se trouvent aussi certainement des Acrisols (Fig. 18) qui n'ont pas été étudiés précisément dans cette étude.

## **Chapitre 4 : COMPARAISON DES ANALYSES DE SOL DES RESEAUX RAINFOR ET GUYAFOR**

### **INTRODUCTION**

Le réseau TmFO doit s'appuyer sur des analyses de sol homogènes entre les sites et, si possible, cohérentes avec les analyses de sol qui sont réalisées au sein d'autres réseaux de dispositifs forestiers tropicaux. En Amazonie, le réseau RAINFOR est constitué d'une centaine de parcelles de 1 ha pour comprendre la dynamique de la forêt Amazonienne (Malhi et al. 2002). En Guyane, le réseau GUYAFOR regroupe une dizaine de parcelles de 4 ha, pour comprendre aussi la dynamique de la forêt tropicale non exploitées et exploitées.

Comme certains dispositifs du projet TmFO sont inclus dans le réseau RAINFOR (ex. Jari, Tapajos) ou bien dans le réseau GUYAFOR (ex. Paracou, Montagne Tortue), l'objectif de ce chapitre 4 est de comparer les analyses de sol qui sont classiquement utilisées dans ces deux réseaux, et de décider quelles analyses devront être effectuées au sein du réseau TmFO afin qu'elles soient le plus compatible possible avec celles des réseaux RAINFOR et GUYAFOR.

### **MATERIEL & METHODES**

Nous avons inventorié et comparé les analyses de sols des réseaux RAINFOR et GUYAFOR en consultant respectivement Quesada et al. (2010) et Desprez et al. (2010). Cette comparaison concerne à la fois le type des analyses réalisées et, pour une analyse donnée, sa méthode.

### **RESULTATS**

Les deux réseaux RAINFOR et GUYAFOR distinguent de la même manière les analyses de sol qui sont réalisées, d'une part, pour classer un profil de sol dans le système international WRB (Tab. 2) et, d'autre part, pour étudier les relations entre le sol (disponibilité des nutriments) et la végétation (Tab. 3).

#### **Analyses de sol pour classer un profil de sol dans le WRB**

Les deux réseaux réalisent des analyses à partir d'échantillons prélevés dans des fosses de profondeurs comparables (respectivement 2 m pour RAINFOR vs 1,4 à 1,8 m pour GUYAFOR). De nombreuses analyses sont similaires : pH, cations échangeables et CEC, Al échangeable, P disponible, éléments totaux (Ca, Mg, K, Na), C, N, granulométrie, argile dispersable à l'eau (Tab. 2). Le réseau RAINFOR réalise en plus le P total et la densité apparente, tandis que le réseau GUYAFOR réalise en plus les éléments totaux (Fe, Al, Si, Mn, Ti) et les éléments amorphes (Fe, Al, Si).

Pour certaines analyses, les méthodes utilisées ne sont pas les mêmes :

- pH eau et pH KCl : rapport en volume sol-solution : 1:2,5 vs 1:5 ;
- P disponible : Résine d'échange anionique ou extraction séquentielle vs P Bray2 ou P Olsen ;
- Eléments totaux : solution : acide sulfurique puis H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vs fluoro-nitro-perchlorique ;
- Granulométrie : méthode Boyoucos vs méthode à la pipette.

Enfin, le réseau RAINFOR mesure Al échangeable par deux méthodes. La première Al Ag-TU, systématiquement utilisée, n'est pas réalisée par le réseau GUYAFOR, tandis que la deuxième Al KCl, réalisée uniquement sur les sols du Brésil, est réalisée par le réseau GUYAFOR.

### **Analyses de sol pour étudier les relations sol-végétation**

Les deux réseaux réalisent des analyses à partir d'échantillons prélevés à des profondeurs très différentes : 8 classes de profondeur allant de 0-5 cm à 150-200 cm pour RAINFOR vs une seule classe de profondeur 0-20 cm pour GUYAFOR. La plupart des analyses sont similaires : pH, cations échangeables et CEC, Al échangeable, P total, P disponible, C, N, granulométrie (Tab. 3). Le réseau RAINFOR réalise en plus les éléments totaux (Ca, Mg, K, Na). Pour certaines analyses, les méthodes utilisées ne sont pas les mêmes :

- pH eau : rapport en volume sol-solution : 1:2,5 vs 1:5 ;
- cations échangeables et CEC : les deux réseaux mesurent ces valeurs au pH du sol, mais la solution est différente : AgTU vs Cobaltihexamine ;
- P disponible : Résine d'échange anionique ou extraction séquentielle vs P Bray2 ou P Olsen ;
- granulométrie : méthode Boyoucos vs méthode à la pipette.

Enfin, le réseau RAINFOR mesure Al échangeable par deux méthodes. La première Al Ag-TU, systématiquement utilisée, n'est pas réalisée par le réseau GUYAFOR, tandis que la deuxième Al KCl, réalisée uniquement sur les sols du Brésil, est réalisée par le réseau GUYAFOR

## **DISCUSSION**

### **Une profondeur d'échantillonnage concordante pour classer les sols dans le WRB**

Pour classer les sols dans le WRB, les deux réseaux RAINFOR et GUYAFOR étudient des profils de sol à des profondeurs similaires : 2m vs 1,4 à 1,8 m. Ces profondeurs dépassent 1 m, qui est la profondeur nécessaire pour pouvoir classer un sol dans le système international WRB. En effet, de nombreux horizons diagnostics de cette classification sont basés sur l'apparition de critères (ex. taches) ou sur des variations de teneurs (ex. argile) dans le premier mètre de profondeur. Pour le projet TmFO, nous choisirons d'étudier des profils de sol jusqu'à une profondeur standard de 1,5 m, une profondeur suffisante pour classer ces profils dans le WRB. Dans certains cas, nous irons jusqu'à 2 m de profondeur si un sondage à la tarière au fond de la fosse révèle l'existence d'un horizon particulier (ex. plinthite) au-delà de 1,5 m de profondeur.

### **Des profondeurs d'échantillonnage discordantes pour étudier les relations sols-végétation**

Pour étudier les relations sol-végétation, les deux réseaux RAINFOR et GUYAFOR réalisent des analyses à partir d'échantillons prélevés à des profondeurs très différentes : 8 classes de profondeur allant de 0-5 cm à 150-200 cm pour RAINFOR vs une seule classe de profondeur 0-20 cm pour GUYAFOR.

La stratégie d'échantillonnage utilisée dans le réseau GUYAFOR jusqu'à 20 cm de profondeur, est basée sur plusieurs faits. Premièrement, dans les vieux sols forestiers tropicaux comme ceux de la Guyane, les principaux nutriments du sol assimilables par les plantes se trouvent essentiellement dans l'horizon de surface. Leur teneur, par exemple celle du carbone (C), diminue rapidement avec la profondeur (Bernoux et al. 1998, Jobbagy & Jackson 2000 ; Fig. 21). Pour le phosphore (P) disponible, les teneurs en profondeur sont si faibles qu'elles se situent en dessous du seuil de détection par les méthodes d'analyse du laboratoire ! Il faut néanmoins nuancer ce propos, en précisant que ces faibles teneurs en profondeur s'observent davantage pour certains éléments (C, P) que pour d'autres (Ca, Na, ...) (Jobbagy & Jackson 2001, Fig. 22). Deuxièmement, c'est dans les 20 premiers cm que se trouve le maximum d'interaction entre le sol et la végétation, via la densité racinaire et l'activité microbienne du sol (Allison et al. 2007). Troisièmement, dans les vieux sols tropicaux, l'essentiel du cycle biogéochimique des nutriments ne se passe pas en profondeur



mais dans les horizons de surface. Poswa et al. (2002) l'ont par exemple montré en Guyane pour le strontium, un marqueur du calcium. Plus généralement, sur ces vieux sols tropicaux, les entrées de nutriments dans le cycle se font par les aérosols et la pluie et non plus par l'altération de la roche en profondeur (Chadwick et al. 1999, Hedin et al. 2003). Ces différents faits expliquent que, dans les études en écologie forestière tropicale, la fertilité chimique d'un sol est déterminée classiquement par la mesure de teneurs d'éléments dans l'horizon de surface du sol 0-20 cm, comme cela a été appliqué dans le réseau GUYAFOR.

La stratégie d'échantillonnage utilisée dans le réseau RAINFOR jusqu'à 2 m de profondeur (Quesada et al. 2010, 2011, 2012) peut se justifier par le fait que certains sols de ce réseau sont plus jeunes que ceux du plateau des Guyanes. On pense aux sols qui se sont formés après la surrection des Andes et la formation du bassin Amazonien, sur des sédiments du tertiaire et du quaternaire. Sur ces sols jeunes, c'est l'altération de la roche qui fournit en profondeur les nutriments (Chadwick et al. 1999). Cela semble cohérent avec des expériences qui ont été menées sur des plantations d'Eucalyptus pour évaluer la part des éléments qui sont extraits des horizons profonds du sol (da Silva et al. 2011). Plus généralement, un article récent de Wigley et al. (2013) recommande, dans les études d'écologie, de mesurer des stocks d'éléments jusqu'aux horizons de profondeur. Cet article met aussi en avant le fait de travailler sur des stocks de nutriments et non pas sur seulement sur des concentrations (Bond 2010). Mais, en pratique, dans leur étude sur les relations entre la forêt et les sols en Amazonie, Quesada et al. (2012) ont présenté seulement les données de sol jusqu'à 30 cm de profondeur !

Pour le Projet TmFO, nous préconisons alors de suivre préférentiellement la stratégie d'échantillonnage utilisée dans le réseau GUYAFOR, c'est à dire jusqu'à 20 cm de profondeur. Pour s'assurer que cette stratégie soit suffisante, nous prélèverons aussi deux sondages complémentaires en profondeur, respectivement à 50 cm et 100 cm.

## **Des analyses de sols parfois différentes, à la fois sur leur nature et leur méthodes**

### **a) Nature des analyses**

Les analyses réalisées au sein des deux réseaux RAINFOR et GUYAFOR sont en grande majorité similaires.

Dans le cadre du projet TmFO, nous préconisons :

- pour classer les sols dans le WRB, de réaliser les analyses communes aux deux réseaux (Tab. 2), auxquelles on rajoutera (i) l'analyse de la densité apparente pour mesurer des stocks de nutriments (ii) et l'analyse des éléments amorphes (Fe, Al) pour expliquer les teneurs en P disponible (Agbenin 2003, Wiriyakitnateekul et al. 2005).
- pour étudier les relations sols-végétation, de réaliser les analyses communes aux deux réseaux (Tab. 3). On conservera bien l'analyse du P total, à la vue de l'étude de Quesada et al. (2012) qui suggèrent que le stock de P total dans le sol interagit avec la dynamique forestière, sur le long terme.

### **b) Méthode des analyses**

Pour une analyse donnée, les méthodes utilisées au sein des deux réseaux RAINFOR et GUYFOR ne sont pas toujours identiques (Tab. 2, Tab. 3). Dans le cadre du projet TmFO, il sera alors nécessaire de faire quelques tests de comparaison entre des méthodes, pour les analyses suivantes :

- pHeau (dilution sol/solvant),
- CEC pH sol
- P disponible

Cette comparaison de méthodes sera effectuée au début du projet sur une partie des échantillons de sol.

En parallèle, une synthèse bibliographique de ces différentes méthodes pourraient aussi conduire à abandonner certaines méthodes. Nous pensons à la méthode Bray2 pour mesurer le P disponible. Elle a été utilisée au sein du réseau GUYAFOR, pour pouvoir se rattacher aux anciennes études d'écologie forestière. Mais, cette méthode, conseillée pour les sols dont le pH est supérieur à 7.5, n'est a priori pas adaptée pour la plupart des sols du projet TmFO.

#### **De nouvelles mesures à réaliser au sein du réseau TmFO**

Les analyses réalisées au sein des réseaux RAINFOR et GUYAFOR sont essentiellement des analyses physico-chimiques. Le projet TmFO travaillant sur un réseau de parcelles exploitées, il sera peut-être pertinent de mesurer aussi d'autres paramètres que ceux des réseaux RAINFOR et GUYAFOR, par exemple des paramètres mesurant l'activité biologique d'un sol et la compaction d'un sol. Réflexion à suivre ...

Tableau 2 : Comparaison des méthodes utilisées dans les réseaux RAINFOR et GUYAFOR, pour mesurer différents paramètres du sol, en vue de classer les profils de sols dans le WRB.

| Paramètre du sol                               | RAINFOR<br>(Quesada et al. 2010)   | GUYAFOR<br>(Desprez et al. 2010)  |
|--|--|---|
| Profondeur des fosses                          | 2 m  | 1,3 m à 1,8 m   |
| Profondeur des échantillons                    |  | En fonction des horizons  |
| pH   | pH eau (1 :2.5)<br>pH KCl (1 M KCl)  | pH eau (1 :5)<br>pH KCl (1 M KCl)   |
| Cations échangeables et CEC                    | Acétate d'ammonium, pH7  | Acétate d'ammonium, pH7   |
| Al échangeable                                 | Tous les échantillons :<br>Méthode Argent-thiourée Ag-TU (Pleysier & Juo 1980)<br>Sous-échantillons : 1 M KCl  | 1 M KCl   |
| Phosphore total                                | Acide sulfurique puis H <sub>2</sub> O <sub>2</sub><br>(Tiessen & Moir 1993)   |   |
| Phosphore disponible                           | Résine d'échange anionique<br>(Nuernberg et al. 1998)<br>Extraction séquentielle avec<br>des réactifs de plus en plus<br>forts : résine, 0.5 M NaHCO <sub>3</sub> ,<br>0.1 M NaOH, 1 M HCl<br>(Hedley et al. 1982) | Bray n°2 (fluorure<br>d'ammonium et HCl)  |
| Eléments totaux<br>- Nature<br><br>- Extractif | Ca, Mg, K, Na<br><br>Acide sulfurique puis H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>   | Ca, Mg, K, Na, Si, Fe, Al, Ti,<br>Mn<br>Tous sauf Si : Fluoro-nitro-<br>perchlorique<br>Si : peroxyde de sodium |
| Eléments amorphes<br>- Nature<br>- Extractif   |  | Fe, Al, Si<br>CBD, oxalate, pyrophosphate   |
| C, N   | Combustion   | Combustion  |
| Granulométrie                                  | Méthode Boyoucos (Gee &<br>Bauder 1986)<br>Argile dispersable à l'eau<br>(horizons sélectionnés)   | Méthode à la pipette par<br>sédimentation (→5 classes)<br>Argile dispersable à l'eau                            |
| Densité apparente                              | Méthode au cylindre<br>3 répétitions par profondeur<br>d'échantillonnage   |   |

Tableau 3 : Comparaison des méthodes utilisées dans les réseaux RAINFOR et GUYAFOR, pour mesurer différents paramètres du sol en vue des études sol-végétation

| Paramètre du sol                           | RAINFOR<br>(Quesada et al. 2010)  | GUYAFOR<br>(Desprez et al. 2010)  |
|--|---|---|
| Profondeur des échantillons                | 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-100, 100-150, 150-200  | 0-20 cm   |
| pH   | pH eau (1 :2.5)   | pH eau (1 :5)   |
| Cations échangeables et CEC                | Argent-thiourée Ag-TU, pH sol (Pleysier & Juo 1980)   | Cobaltihexamine, pH sol   |
| Al échangeable                             | Tous les échantillons :<br>Argent-thiourée Ag-TU, pH sol (Pleysier & Juo 1980)<br>Sous-échantillons : 1 M KCl   | 1 M KCl   |
| Phosphore total                            | Acide sulfurique puis H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Tiessen & Moir 1993)   | fluoro-nitro-perchlorique   |
| Phosphore disponible                       | Résine d'échange anionique (Nuernberg et al. 1998)<br><br>Extraction séquentielle avec des réactifs de plus en plus forts : résine, 0.5 M NaHCO <sub>3</sub> , 0.1 M NaOH, 1 M HCl (Hedley et al. 1982) | Bray n°2 (fluorure d'ammonium et HCl)<br><br>Bray Olsen (bicarbonate de sodium) |
| Eléments totaux<br>- Nature<br>- Extractif | Ca, Mg, K, Na<br>Acide sulfurique puis H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  |   |
| C, N                                       | Combustion  | Combustion  |
| Granulométrie                              | Méthode Boyoucos (Gee & Bauder 1986)  | Méthode à la pipette par sédimentation (→5 classes)                             |

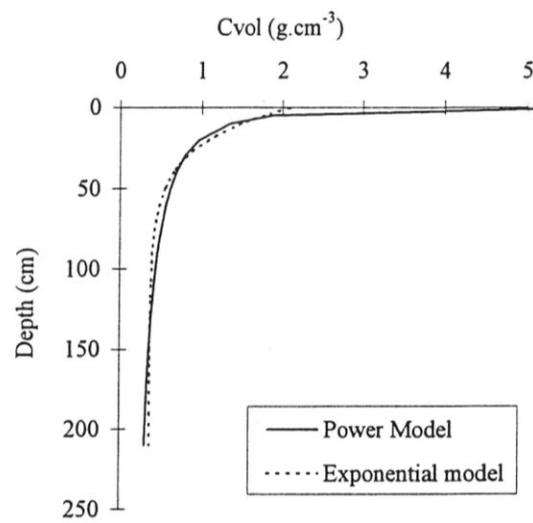


Fig. 21 : Modélisation du stock de carbone du sol à partir de 519 profils de Ferralsols d'Amazonie (Rondonia, Brésil). Figure de Bernoux et al. 1998.

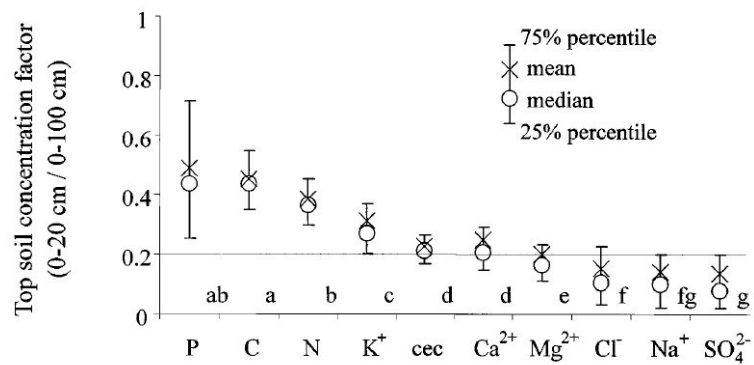


Fig. 22 : Part relative de la teneur de différents nutriments du sol dans le sol de surface 0-20 cm par rapport à 0-100 cm. Figure tirée de Jobbagy & Jackson 2001.



## **Chapitre 5 : DEBAT SCIENTIFIQUE AVEC R. POCCARD**

Lors de notre mission, R. Pocard (Cirad, Umr Selmet, Belem) nous a posé plusieurs questions en lien avec les sols de son terrain d'étude sur le Municipe du Paragominas

### **L'origine des « montagnes russes » du Paragominas**

Dans les zones déforestées et cultivées ou pâturées du Paragominas, le paysage est souvent marqué par une succession de buttes d'une dizaine de mètres de diamètre et de quelques mètres de hauteur. Quelle est l'origine de ces buttes ?

A priori, nous pensons que ces buttes sont des termitières. En effet, nous avons aussi trouvé ce type de paysage en forêt, sur le dispositif de La Cikel, qui était dû à des termitières (Chap. 1). La déforestation a tout simplement mis en évidence l'abondance de ces termitières.

### **Faut-il corriger par la teneur en argile, les stocks de carbone du sol mesurés sous pâturage après déforestation ?**

Lors d'études comparatives de différents sites (forêts, pâturages d'âges différents issus d'une déforestation) sur leur capacité à stocker du carbone dans le sol, il est classique de corriger la teneur en carbone par la teneur en argile. En effet, il est connu que la teneur en carbone dépende de la teneur en argile (Feller et al. 1998, Zinn et al. 2005). Cette correction permet alors de comparer les teneurs en carbone de différents sites qui sont situés sur des sols de textures différentes. Toutefois, cette correction fait implicitement l'hypothèse que la texture d'un sol ne change pas lors du passage d'une forêt à un pâturage. Cette hypothèse n'est a priori pas valide, puisque la déforestation s'accompagne en général d'une moindre couverture du sol, ce qui favoriserait l'érosion du sol et le départ de ses éléments fins (argile, ...) donc une modification de la texture du sol.

En conclusion, si on veut rendre compte de tous les phénomènes qui rentrent en jeu lors du passage de la forêt au pâturage, nous ne recommandons pas de corriger la teneur en carbone par la teneur en argile du pâturage.

### **Leçons agronomiques tirées des Terra preta. Conseils bibliographiques**

Les terra preta de Indio sont des terres noires (Dark earths) qui ont une très grande fertilité par rapport à des Ferralsols classiques. Elles se distribuent le long de l'Amazone et de ses principaux affluents (Tapajos, ...). Ces terres noires proviennent d'un enrichissement volontaire (par incorporation dans le sol de charbons de bois) ou involontaire (« décharge ») du sol par les amérindiens qui ont occupé ces zones il y a plusieurs centaines d'années. Ces anciennes pratiques des amérindiens pourraient donc être un modèle d'agriculture durable dans les zones tropicales humides. Nous conseillons ci-dessous une sélection de quelques références bibliographiques qui, d'une part, présentent les propriétés des terres noires et, d'autre part, étudient l'influence du charbon de bois (charcoal ou biochar) sur la fertilité des sols.

#### **Bibliographie (Terra preta, relations charbons de bois-fertilité des sols)**

Glaser B 2007 Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences 362, 187-196.

Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G and Zech W 2001 The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. Naturwissenschaften 88, 37-41.

- Glaser B, Lehmann J and Zech W 2002 Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology and Fertility of Soils* 35, 219-230.
- Glaser B and Birk J J 2012 State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Indio). *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 82, 39-51.
- Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, Nehls T, Zech W and Glaser B 2003 Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249, 343-357.
- Lehmann J, Kern D C, Glaser B and Woods W I 2004 Amazonian Dark Earths: origin, properties, management. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 500 p.
- Major J, Rondon M, Molina D, Riha S J and Lehmann J 2004 Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil* 333, 117-128.
- Topoliantz S, Ponge J F and Ballof S 2005 Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics. *Biology and Fertility of Soils* 41, 15-21.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abe S S, Yamamoto S and Wakatsuki T 2009 Physicochemical and morphological properties of termite (*Macrotermes bellicosus*) mounds and surrounding pedons on a toposequence of an inland valley in the southern Guinea savanna zone of Nigeria. *Soil Science and Plant Nutrition* 55, 514-522.
- Agbenin J O 2003 Extractable iron and aluminum effects on phosphate sorption in a savanna alfisol. *Soil Science Society of America Journal* 67, 589-595.
- Allison V J, Allison V J, Yermakov Z, Miller R M, Jastrow J D and Matamala R 2007 Assessing soil microbial community composition across landscapes: Do surface soils reveal patterns? *Soil Science Society of America Journal* 71, 730-734.
- Baker T R, Burslem D and Swaine M D 2003 Associations between tree growth, soil fertility and water availability at and regional scales in Ghanaian tropical rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 19, 109-125.
- Bachelier G 1977 Mise au point sur l'action des termites dans les sols. *Science du Sol*, 3-12.
- Baraloto C, Bonal D and Goldberg D E 2006 Differential seedling growth response to soil resource availability among nine neotropical tree species. *Journal of Tropical Ecology* 22, 487-497.
- Beaudrot L, Du Y J, Kassim A R, Rejmanek M and Harrison R D 2013 Do Epigeal Termite Mounds Increase the Diversity of Plant Habitats in a Tropical Rain Forest in Peninsular Malaysia? *PLoS One* 6.
- Bernoux M, Arrouays D, Cerri C C and Bourennane H 1998 Modeling vertical distribution of carbon in oxisols of the western Brazilian Amazon (Rondonia). *Soil Science* 163, 941-951.
- Bond W J 2010 Do nutrient-poor soils inhibit development of forests? A nutrient stock analysis. *Plant and Soil* 334, 47-60.
- Brossard M, Lopez-Hernandez D, Lepage M and Leprun J C 2007 Nutrient storage in soils and nests of mound-building *Trinervitermes* termites in Central Burkina Faso: consequences for soil fertility. *Biol. Fertil. Soils* 43, 437-447.
- Chadwick O A, Derry L A, Vitousek P M, Huebert B J and Hedin L O 1999 Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature* 397, 491-497.
- da Silva E V, Bouillet J P, Goncalves J L D, Abreu C H, Trivelin P C O, Hinsinger P, Jourdan C, Nouvellon Y, Stape J L and Laclau J P 2011 Functional specialization of Eucalyptus fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Functional Ecology* 25, 996-1006.
- Desprez M, Ferry B and Freycon V 2010 Caractérisation morphologique des sols de neuf placettes permanentes forestières du réseau Guyafor (Guyane Française). pp 60. Cirad, AgroParisTech, Umr Ecofog, Kourou.
- Donovan S E, Eggleton P, Dubbin W E, Batchelder M and Dibog L 2001 The effect of a soil-feeding termite, *Cubitermes fungifaber* (Isoptera : Termitidae) on soil properties: termites may be an important source of soil microhabitat heterogeneity in tropical forests. *Pedobiologia* 45, 1-11.
- Donovan S E, Griffiths G J K, Homathevi R and Winder L 2007 The spatial pattern of soil-dwelling termites in primary and logged forest in Sabah, Malaysia. *Ecol. Entomol.* 32, 1-10.
- Eschenbrenner V 1986 Contribution des termites à la micro-agrégation des sols tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XXII, 397-408.

- Feller C, Fritsch E, Poss R and Valentin C 1991 Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XXVI, 25-36.
- Filleron J C, Le-Fol J and Freycon V 2004 Diversité et originalité des modelés forestiers guyanais. *Revue forestière française* LV, 19-36.
- Fritsch E, Herbillon A J, Do Nascimento N R, Grimaldi M and Melfi A J 2007 From Plinthic Acrisols to Plinthosols and Gleysols: iron and groundwater dynamics in the tertiary sediments of the upper Amazon basin. *European Journal of Soil Science* 58, 989-1006
- Hedin L O, Vitousek P M and Matson P A 2003 Nutrient losses over four million years of tropical forest development. *Ecology* 84, 2231-2255.
- IUSS Working Group WRB 2006 World reference base for soil resources 2006. FAO, Rome. 128 p.
- Jobbagy E G and Jackson R B 2000 The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10, 423-436.
- Jobbagy E and Jackson R B 2001 The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry* 53, 51-77.
- Lu M Z, Davidescu M, Sukri R S and Daskin J H 2013 Termites facilitate root foraging by trees in a Bornean tropical forest. *Journal of Tropical Ecology* 29, 563-566.
- Malhi Y, Phillips O L, Lloyd J, Baker T, Wright J, Almeida S, Arroyo L, Frederiksen T, Grace J, Higuchi N, Killeen T, Laurance W F, Leano C, Lewis S, Meir P, Monteagudo A, Neill D, Vargas P N, Panfil S N, Patino S, Pitman N, Quesada C A, Ruelas-Ll A, Salomao R, Saleska S, Silva N, Silveira M, Sombroek W G, Valencia R, Martinez R V, Vieira I C G and Vinceti B 2002 An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). *Journal of Vegetation Science* 13, 439-450.
- Nobre A D, Cuartas L A, Hodnett M, Renno C D, Rodrigues G, Silveira A, Waterloo M and Saleska S 2011 Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology* 404, 13-29.
- Paoli G D and Curran L M 2007 Soil nutrients limit fine litter production and tree growth in mature lowland forest of Southwestern Borneo. *Ecosystems* 10, 503-518.
- Poszwa A, Dambrine E, Ferry B, Pollier B and Loubet M 2002 Do deep tree roots provide nutrients to the tropical rainforest ? *Biogeochemistry* 60, 97-118.
- Quesada C A, Lloyd J, Schwarz M, Patiño S, Baker T R, Czimczik C, Fyllas N M, Martinelli L, Nardoto G B, Schmerler J, Santos A J B, Hodnett M G, Herrera R, Luizão F J, Arneeth A, Lloyd G, Dezzio N, Hilke I, Kuhlmann I, Raessler M, Brand W A, Geilmann H, Moraes Filho J O, Carvalho F P, Araujo Filho R N, Chaves J E, Cruz Junior O F, Pimentel T P and Paiva R 2010 Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences* 7, 1515-1541.
- Quesada C A, Lloyd J, Anderson L O, Fyllas N M, Schwarz M and Czimczik C I 2011 Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences* 8, 1415-1440.
- Quesada C A, Phillips O L, Schwarz M, Czimczik C I, Baker T R, Patino S, Fyllas N M, Hodnett M G, Herrera R, Almeida S, Davila E A, Arneeth A, Arroyo L, Chao K J, Dezzio N, Erwin T, di Fiore A, Higuchi N, Coronado E H, Jimenez E M, Killeen T, Lezama A T, Lloyd G, Lopez-Gonzalez G, Luizao F J, Malhi Y, Monteagudo A, Neill D A, Vargas P N, Paiva R, Peacock J, Penuela M C, Cruz A P, Pitman N, Priante N, Prieto A, Ramirez H, Ruelas A, Salomao R, Santos A J B, Schmerler J, Silva N, Silveira M, Vasquez R, Vieira I, Terborgh J and Lloyd J 2012 Basin-wide variations

- in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences* 9, 2203-2246.
- Reatto A, Bruand A, Martins E D, Muller F, da Silva E M, de Carvalho O A, Brossard M and Richard G 2009 Development and origin of the microgranular structure in latosols of the Brazilian Central Plateau: Significance of texture, mineralogy, and biological activity. *Catena* 76, 122-134.
- Renno C D, Nobre A D, Cuartas L A, Soares J V, Hodnett M G, Tomasella J and Waterloo M J 2008 HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sens. Environ.* 112, 3469-3481.
- Roose-Amsaleg C, Mora P and Harry M 2005 Physical, chemical and phosphatase activities characteristics in soil-feeding termite nests and tropical rainforest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 37, 1910-1917.
- Sarcinelli T S, Schaefer C E G R, Lynch L d S, Arato H D, Viana J H M, Filho M R d A and Gonçalves T T 2009 Chemical, physical and micromorphological properties of termite mounds and adjacent soils along a toposequence in Zona da Mata, Minas Gerais State, Brazil. *CATENA* 76, 107-113.
- Sarcinelli T S, Schaefer C, Fernandes E I, Mafia R G and Neri A V 2013 Soil modification by termites in a sandy-soil vegetation in the Brazilian Atlantic rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 29, 439-448.
- Schaefer C E R 2001 Brazilian latosols and their B horizon microstructure as long-term biotic constructs. *Australian Journal of Soil Research* 39, 909-926.
- Sist P and Ferreira F N 2007 Sustainability of reduced-impact logging in the Eastern Amazon. *Forest Ecology and Management* 243, 199-209.
- Verelst L 2009 Harmonized World Soil Database Viewer. FAO, CAS, IIASA, ISRIC, JRC.
- Wigley B J, Coetsee C, Hartshorn A S and Bond W J 2013 What do ecologists miss by not digging deep enough? Insights and methodological guidelines for assessing soil fertility status in ecological studies. *Acta Oecol.-Int. J. Ecol.* 51, 17-27.
- Wiriyakitnatekul W, Suddhiprakarn A, Kheuruenromne I and Gilkes R J 2005 Extractable iron and aluminium predict the P sorption capacity of Thai soils. *Australian Journal of Soil Research* 43, 757-766.
- Yamashina C 2013 Variation in savanna vegetation on termite mounds in north-eastern Namibia. *Journal of Tropical Ecology* 29, 559-562.
- Zinn Y L, Lal R and Resck D V S 2005 Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma* 127, 168-173.

**Annexe 1 – Calendrier de la mission  
V. Freycon, 4 au 14 novembre 2013**

| Jour             | Matin   | Après-midi                 |
|------------------|---|----------------------------|
| Lundi 4 nov.     |   | Voyage Montpellier-Paris   |
| Mardi 5 nov.     | Voyage Paris-Sao Paulo-Belem  | Belem : Embrapa            |
| Mercredi 6 nov.  | Voyage Belem-La Cikel   |                            |
| Jeudi 7 nov.     | La Cikel : prospection tarière EcoSilva                                 |                            |
| Vendredi 8 nov.  | La Cikel : prospection tarière EcoSilva, description d'un profil de sol |                            |
| Samedi 9 nov.    | La Cikel : prospection tarière Tepeco                                   |                            |
| Dimanche 10 nov. | Voyage La Cikel-Moju  | Moju : prospection tarière |
| Lundi 11 nov.    | Moju : prospection tarière  |                            |
| Mardi 12 nov.    | Moju : description de deux profils de sol                               | Voyage Moju-Belem          |
| Mercredi 13 nov. | Belem : Embrapa   |                            |
| Jeudi 14 nov.    | Belem : Embrapa   | Voyage Belem - Cayenne     |

## Annexe 2 – Code Munsell de quelques sondages tarière des sites de La Cikel et de Moju

| Site : La Cikel, dispositif Ecosilva |                   |          |         |
|--------------------------------------|-------------------|----------|---------|
| Profondeur                           | s1                | s2       | s3      |
| [0-10 cm]                            | 10YR5/4           | 10YR5/6  | 10YR5/4 |
| [10-20 cm]                           | 10YR5/6           | 10YR6/6  | 10YR6/6 |
| [20-40 cm]                           | 10YR6/8           | 10YR6/6  | 10YR6/6 |
| [40-60 cm]                           | (10YR à 7.5YR)6/8 | 10YR6/8  | 10YR6/8 |
| [60-80 cm]                           | 7.5YR6/8          | 7.5YR6/8 | -       |
| [80-100 cm]                          | -                 | -        | -       |

| Site : La Cikel, dispositif Peteco |                   |                   |                   |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Profondeur                         | s7                | s8                | s9                |
| [0-10 cm]                          | 10YR5/6           | 10YR5/4           | 10YR5/4           |
| [10-20 cm]                         | 10YR6/6           | 10YR5/6           | 10YR6/6           |
| [20-40 cm]                         | 10YR6/6           | 10YR5/6           | 10YR6/6           |
| [40-60 cm]                         | 10YR6/8           | (10YR à 7.5YR)6/6 | (10YR à 7.5YR)6/6 |
| [60-80 cm]                         | (10YR à 7.5YR)6/8 | 7.5YR6/6          | 7.5YR6/6          |
| [80-100 cm]                        | 7.5YR6/6          | 7.5YR6/6          | 7.5YR6/6          |

| Site : Moju |          |          |                  |         |
|-------------|----------|----------|------------------|---------|
| Profondeur  | s13      | s14      | s15              | s17     |
| [0-10 cm]   | 2.5Y5/3  | 2.5Y4/3  | 2.5Y4/3          | 10YR4/3 |
| [10-20 cm]  | 2.5Y5/3  | 2.5Y5/3  | 2.5Y5/3          | 10YR5/3 |
| [20-40 cm]  | 2.5Y6/4  | 2.5Y6/3* | 2.5Y6/3          | 10YR5/4 |
| [40-60 cm]  | 2.5Y6/4  | 2.5Y6/3  | 2.5Y7/4          | 10YR6/4 |
| [60-80 cm]  | 2.5Y7/4* | 2.5Y7/3* | (2.5Y à 10YR)7/4 | 10YR6/5 |
| [80-100 cm] | 2.5Y7/4  | 2.5Y7/3  | 10YR7/6          | 10YR6/6 |

\*Taches 7.5YR6/8 (jaune rouge)

| Site : Moju (suite) |           |                   |          |          |          |
|---------------------|-----------|-------------------|----------|----------|----------|
| Profondeur          | s18       | s19               | s20      | s21      | s22      |
| [0-10 cm]           | 2.5Y5/2   | 2.5Y5/3           | 2.5Y5/3  | 2.5Y5/2  | 2.5Y4/3  |
| [10-20 cm]          | 2.5Y5/2   | 2.5Y5/3           | 2.5Y5/2  | 2.5Y5/2  | 2.5Y4/3  |
| [20-40 cm]          | 2.5Y6/2** | 2.5Y6/3           | 2.5Y6/2  | 2.5Y6/2  | 2.5Y5/3  |
| [40-60 cm]          | 2.5Y6/2   | 2.5Y7/4*          | 2.5Y7/2* | 2.5Y7/3* | 2.5Y7/4* |
| [60-80 cm]          | 2.5Y7/2   | 2.5Y7/4*          | 2.5Y7/2* | 2.5Y7/3* | 2.5Y6/4* |
| [80-100 cm]         | 2.5Y7/2   | (2.5Y à 10YR)7/4* | 2.5Y7/3* | 2.5Y7/3  | 2.5Y6/4* |

\*Taches 7.5YR6/8 (jaune rouge) ; \*\*Taches brunes



### **Annexe 3 – Description du profil Cikel-Ecosilva**

Id : TmFO-Cikel

Ouverture de la fosse : 8 novembre 2013 (2 ouvriers de La Cikel, Fabiano de Carvalho)

Description de la fosse : 8 novembre 2013

Auteur : V. Freycon

Dimension de la fosse : Longueur=1,50 m x largeur =1m x Prof.=1,30 m

Localisation :

La Cikel, dispositif Ecosilva

Proximité du transect A

Relevé GPS,

WGS84, UTM 22S : x = 768900 m E ; y = 9591690 m S

Coordonnées géographiques : Latitude = 3°41'27" S ; Longitude = 48°34'45" W

Végétation : Forêt tropicale humide exploitée en 2004

Géologie : Terrasses sédimentaires du Tertiaire (formation Barreiras)

Antécédents climatiques : Pluie moyenne les jours précédents

Hydrologie :

Régime hydrique sec de manière saisonnière

Drainage naturel favorable

Sans excès d'eau

Géomorphologie :

Pente = 2 %

Morphologie locale : sur une pente régulière

Situation dans la forme : au sommet du versant

#### **Profil**

Le profil décrit correspond à la face sud de la fosse.

Le profil a été découpé en 5 horizons principalement suivant la répartition des racines.

Observation de termites vivants sur les parois de la fosse.

Horizon 1 [0 - 5 cm]

Frais. 10YR4/4 (dark yellowish brown). Absence de taches. Argileux. Structure grumeleuse 4 mm forte. Très poreux. Meuble. Racines fines très nombreuses, grosses peu nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Traces de termitières nombreuses (terre dure consolidée. Voir photo). Transition régulière sur 0,5 cm.

Horizon 2 [5 – 15 cm]

Frais. 10YR5/6 (yellowish brown). Absence de taches. Argileux. Structure polyédrique subanguleuse 10 mm modérée et sous-structure grumeleuse 4 mm modérée. Poreux. Peu compact. Racines grosses nombreuses et très fines peu nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Transition régulière sur 3 cm.

### Horizon 3 [15 – 40 cm]

Humide. 10YR6/6 (brownish yellow). Absence de taches. Argileux. Structure polyédrique subanguleuse 20 mm forte et sous-structure microagrégée 1 mm faible. Poreux. Peu compact. Racines très grosses nombreuses et très fines peu nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Transition régulière sur 5 cm.

### Horizon 4 [40 – 85 cm]

Frais à sec. 10YR6/8 (brownish yellow). Taches 10R3/4 (dusky red), très peu nombreuses, grosses, très nettes, très contrastées en remplissage de fissures. Argileux. Structure polyédrique subanguleuse 10 mm modérée et sous-structure microagrégée 1 mm modérée. Poreux. Compact. Racines très fines nombreuses. La densité de racines est forte dans les taches qui correspondent certainement à la mort d'anciennes racines. Absence d'éléments grossiers. Traces de termitières et de charbons de bois peu nombreuses. Transition régulière sur 5 cm.

### Horizon 5 [85 – 130 cm]

Sec. 7.5YR6/8 (reddish yellow). Absence de taches. Argileux. Structure polyédrique subanguleuse 30 mm faible et sous-structure microagrégée 1 mm forte. Poreux. Très compact. Racines très fines et moyennes peu nombreuses. Galerie de rongeur. Traces de termitières peu nombreuses. Absence d'éléments grossiers.

Profondeur de prélèvement des échantillons de sol par horizon :

Horizon 1 : 0-5 cm

Horizon 2 : 5-15 cm

Horizon 3 : 25 cm  $\pm$  5 cm

Horizon 4 : 60 cm  $\pm$  5 cm

Horizon 5 : 110-120 cm



Profil La Cikel-Ecosilva : sol prélevé entre 0 et 5 cm de profondeur. En séchant, cet échantillon a durci et met en évidence un sol façonné (ex. cavités) a priori par des termites



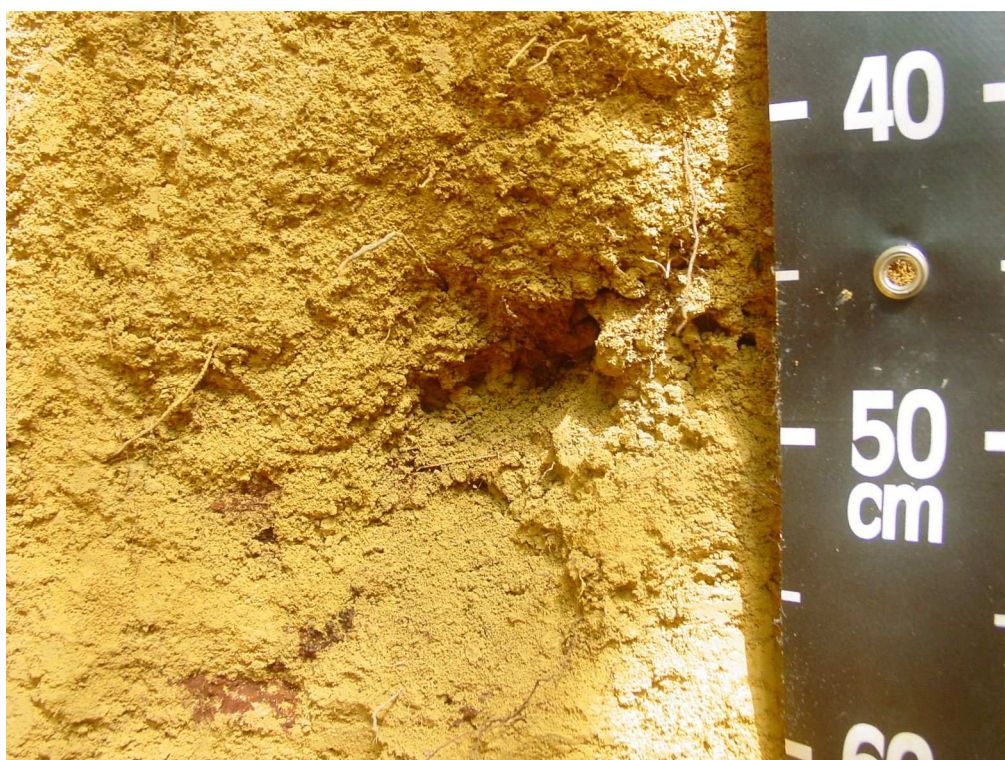


Profil de sol, La Cikel-Ecosilva





Profil La Cikel-Ecosilva (face orientée à l'est) : abondance de racines dans des cavités



Profil La Cikel-Ecosilva (face orientée à l'ouest) : galerie de termites. Les taches rouges correspondent à du bois en décomposition

## Annexe 4 – Description du profil Moju-1

Id : TmFO-Moju1

Ouverture de la fosse : 11 novembre 2013 (2 villageois, Lucas Mazzei de Freitas)

Description de la fosse : 12 novembre 2013

Auteur : V. Freycon

Dimension de la fosse : Longueur=1,50 m x largeur =1m x Prof.=1,20 m

Localisation :

Moju, dispositif Embrapa Belem

Nord de la piste principale

Relevé GPS,

WGS84, UTM 22S : x = 744750 m E ; y = 9761920 m S

Coordonnées géographiques : Latitude = 2°09'09" S ; Longitude = 48°47'58" W

Végétation : Forêt tropicale humide exploitée en 1997

Géologie : Terrasses sédimentaires du Tertiaire (formation Barreiras)

Antécédents climatiques : Pluie faible les jours précédents

Hydrologie :

Régime hydrique saturé de manière saisonnière

Drainage naturel faible

Certainement nappe perchée temporaire

Géomorphologie :

Pente = 5 %

Morphologie locale : sur une pente régulière

Situation dans la forme : A 15 m d'un lit de rivière temporaire

Profil

Nombre d'horizons : 4

Un horizon de transition entre les horizons 2 et 3, présent seulement sur la partie gauche du profil, n'a pas été décrit.

Horizon 1 [0 – 2/3 cm]

Frais. 2.5Y5/1 (gray). Absence de taches. Sableux, nombreux sables délavés. Structure particulière. Très poreux. Meuble. Racines fines nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Fourmis peu nombreuses. Transition régulière sur 0,5 cm.

Horizon 2 [2/3 – 20/25 cm]

Frais. 2.5Y5/2 (grayish brown). Taches 2.5Y4/1 (dark gray) peu nombreuses, fines, nettes, peu contrastées, dans la matrice. Argilo-sableux (limoneux). Structure polyédrique sub-anguleuse 20 mm modérée. Poreux. Peu compact. Racines moyennes et grosses très nombreuses, racines fines nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Charbons de bois peu nombreux. Transition ondulée sur 3 cm.

Horizon 3 [20/25 – 65/70 cm]

Humide. 2.5Y6/2 à 7/2 (light brownish gray à light gray). Taches 2.5Y5/3 (light olive brown) très peu nombreuses, grosses, nettes, très contrastées, en remplissage de fissures, correspondant à des racines en décomposition. Argilo-sableux (limoneux). Structure polyédrique sub-anguleuse 40 mm forte et sur-structure prismatique faible. Poreux. Observation de pores verticaux (anciennes racines ?). Peu compact à compact. Racines moyennes nombreuses, racines fines et très fines peu

nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Charbons de bois peu nombreux. Transition ondulée sur 5 cm.

Horizon 4 [60/70 – 120 cm]

Frais. 2.5Y7/2 (light gray). Taches 10YR6/8 (brownish yellow) peu nombreuses, fines, nettes, peu contrastées, en remplissage de fissures, correspondant à des racines mortes. Argilo-limono-sableux. Structure prismatique 60 mm modérée et sous-structure polyédrique sub-anguleuse 20 mm faible. Peu à très peu poreux. Compact. Racines fines peu nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Charbons de bois peu nombreux.

Profondeur de prélèvement des échantillons de sol par horizon :

Horizon 1 : 0-3 cm

Horizon 2 : 10-20 cm

Horizon 3 : 40 cm

Horizon 3 : 60 cm

Horizon 4 : 110 cm





Profil Moju1 (Photo : L. Blanc)



## Annexe 5 – Description du profil Moju2

Id : TmFO-Moju2

Ouverture de la fosse : 12 novembre 2013 (2 villageois, Lucas Mazzei de Freitas)

Description de la fosse : 12 novembre 2013

Auteur : V. Freycon

Dimension de la fosse : Longueur=1,50 m x largeur =1m x Prof.=1,30 m

Localisation :

Moju, dispositif Embrapa Belem

Nord de la piste principale, au sein de la parcelle P14

Relevé GPS,

WGS84, UTM 22S : x = 745035 m E ; y = 9761995 m S

Coordonnées géographiques : Latitude = 2°09'06" S ; Longitude = 48°47'49"W

Végétation : Forêt tropicale humide exploitée en 1997

Géologie : Terrasses sédimentaires du Tertiaire (formation Barreiras)

Antécédents climatiques : Pluie faible les jours précédents

Hydrologie :

Régime hydrique saturé de manière saisonnière

Drainage naturel faible

Certainement nappe perchée temporaire

Géomorphologie :

Pente = ? %

Morphologie locale : sur une pente régulière

Situation dans la forme :

Profil

Nombre d'horizons : 5

Horizon 1 [0 – 5 cm]

Sec. 2.5Y5/3 (light olive brown). Absence de taches. Sableux, nombreux sables délavés. Structure particulière. Très poreux. Meuble. Racines fines très nombreuses et moyennes peu nombreuses. Mat rainiaire de racines très fines, d'1 cm d'épaisseur. Absence d'éléments grossiers. Transition régulière sur 0,5 cm.

Horizon 2 [5 – 10/15 cm]

Frais. 2.5Y5/3 (light olive brown). Taches 2.5Y3/1 (very dark gray) peu nombreuses, moyennes, en remplissage de fissures. Sableux. Structure polyédrique sub-anguleuse 10 mm faible. Poreux. Peu compact. Racines moyennes nombreuses, racines grosses et fines peu nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Transition ondulée sur 2 cm.

Horizon 3 [10/15 – 35/40 cm]

Frais à humide. 2.5Y(5/3 à 6/3) dans la partie supérieure à 2.5Y6/3 (light yellowish brown) dans la partie inférieure de l'horizon. Taches 2.5Y5/3 (light olive brown) nombreuses, fines, nettes, peu contrastées dans la partie supérieure de l'horizon. Argilo-sableux (limoneux). Structure polyédrique sub-anguleuse 30 mm forte. Poreux. Peu compact. Racines (?). Absence d'éléments grossiers. Charbons de bois peu nombreux. Transition ondulée sur 2 cm.

Horizon 4 [35/40 – 110 cm]

Frais à humide. 2.5Y7/3 (pale yellow) dans la partie supérieure à 10YR7/3 (very pale brown) dans la partie inférieure de l'horizon. Taches 10YR7/8 (yellow) nombreuses, nettes, peu contrastées, dans la matrice. Argilo-sablo-limoneux. Structure polyédrique sub-anguleuse 30 mm modérée et sous-structure micro-agrégée 1 mm faible. Peu poreux. Compact. Racines fines peu nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Transition régulière sur 1 cm

Horizon 5 [110 – 120 cm]

Sec. 10YR7/4 (very pale brown). Taches 5Y5/8 (olive), peu nombreuses, moyennes, nettes, contrastées, dans la matrice. Argilo-limono-sableux. Structure massive. Très peu poreux. Très compact. Racines moyennes peu nombreuses. Absence d'éléments grossiers.

Profondeur de prélèvement des échantillons de sol par horizon :

Horizon 1 : 0-5 cm

Horizon 2 : 10-15 cm

Horizon 3 : 30 cm

Horizon 4 : 70-80 cm

Horizon 5 : 120 cm



Profil Moju2 (Photo : L. Blanc)



Profil Moju2 : Taches 10YR7/8 (yellow) à partir de 35 cm de profondeur.

**Annexe 6 – Relevés GPS (WGS84, UTM 22S) réalisés lors du terrain TmFO et altitude  
(source SRTM)**

| <b>Id GPS</b> | <b>Site</b> | <b>Dispositif</b> | <b>Parcelle</b> | <b>Type</b>                | <b>X</b> | <b>Y</b> | <b>Altitude (m)</b> |
|---------------|-------------|-------------------|-----------------|----------------------------|----------|----------|---------------------|
| Blanc_150     | La Cikel    | Ecosilva          | P1              | s1                         | 768908   | 9591705  | 166                 |
| Blanc_164     | La Cikel    | Ecosilva          | P9              | s2                         | 768205   | 9591171  | 168                 |
| Blanc_165     | La Cikel    | Ecosilva          | P6              | s3                         | 768456   | 9591468  | 170                 |
| 224           | La Cikel    | Ecosilva          | P10             | s4                         | 768615   | 9592040  | 167                 |
| 225           | La Cikel    | Ecosilva          | P14             | s5                         | 768250   | 9591740  | 168                 |
| 226           | La Cikel    | Ecosilva          | P18             | s6, Ecosilva-1             | 767975   | 9591470  | 166                 |
| 227           | La Cikel    | Ecosilva          |                 | Ecosilva-2                 | 768550   | 9591975  | 172                 |
| 228           | La Cikel    | Ecosilva          |                 | Fosse Ecosilva             | 768905   | 9591690  | 166                 |
| 230           | La Cikel    | Peteco            | P16             | s7                         | 744790   | 9610060  | 118                 |
| 231           | La Cikel    | Peteco            | P15             | s8                         | 745180   | 9610075  | 125                 |
| 232           | La Cikel    | Peteco            |                 | s9                         | 745530   | 9610215  | 119                 |
| 233           | La Cikel    | Peteco            |                 | s10                        | 744810   | 9610485  | 119                 |
| 234           | La Cikel    | Peteco            | P21             | s11                        | 745160   | 9610585  | 120                 |
| 235           | La Cikel    | Peteco            |                 | s12                        | 745415   | 9610595  | 114                 |
| 237           | Moju        | Moju              | P9              | s13                        | 745345   | 9761745  | 37                  |
| 238           | Moju        | Moju              | P14             | s14, fosse Moju-2          | 745035   | 9761995  | 36                  |
| 239           | Moju        | Moju              | P16             | s15                        | 744590   | 9762020  | 30                  |
| 240           | Moju        | Moju              |                 | s16                        | 746310   | 9761300  | 24                  |
| 241           | Moju        | Moju              |                 | s17                        | 746040   | 9761420  | 28                  |
| 242           | Moju        | Moju              |                 | s18, fosse Moju-1          | 744750   | 9761920  | 36                  |
| 243           | Moju        | Moju              | P21             | s19                        | 744690   | 9761585  | 35                  |
| 244           | Moju        | Moju              | P12             | s20                        | 744625   | 9761345  | 37                  |
| 245           | Moju        | Moju              | P4              | s21                        | 744905   | 9760375  | 37                  |
| 246           | Moju        | Moju              | P5              | s22                        | 745400   | 9761115  | 34                  |
| Rio1          | Moju        | Moju              |                 | Rivière                    | 746550   | 9761225  |                     |
| Rio2          | Moju        | Moju              |                 | Rivière                    | 746475   | 9761245  |                     |
| T1            | Moju        | Moju              |                 | Piste, passerelle --> Rio  | 746300   | 9761320  |                     |
| T2            | Moju        | Moju              |                 | Piste                      | 746030   | 9761450  |                     |
| T3            | Moju        | Moju              |                 | Piste                      | 744680   | 9761905  |                     |
| T31           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744720   | 9761920  |                     |
| T32           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744800   | 9761990  |                     |
| T33           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744845   | 9762080  | 34                  |
| T34           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744620   | 9761845  | 32                  |
| T35           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744590   | 9761795  | 32                  |
| T36           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744520   | 9761755  | 33                  |
| 247           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744905   | 9762145  |                     |
| 248           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744970   | 9762260  |                     |
| 249           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744940   | 9762280  |                     |
| 250           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744985   | 9762290  |                     |
| 251           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744985   | 9762475  |                     |
| 252           | Moju        | Moju              |                 | Lit sec rivière            | 744990   | 9762600  | 34                  |
| 236_Term1     |             |                   |                 | Route, paysage termitières | 727030   | 9637290  | 34                  |
| 236_Term2     |             |                   |                 | Route, paysage termitières | 726585   | 9639485  |                     |



## Annexe 7 – Echantillons de sol TmFO prélevés en vue d'analyses physico-chimiques

### Prélèvements au sein des fosses, pour classer les sols dans le WRB

| Id labo | Site           | Prof. Min | Prof. Max | Commentaires              |
|---------|----------------|-----------|-----------|---------------------------|
| 1       | Cikel-Ecosilva | 0         | 5         | Profil de référence → WRB |
| 2       |                | 5         | 15        |                           |
| 3       |                | 20        | 30        |                           |
| 4       |                | 55        | 65        |                           |
| 5       |                | 110       | 120       |                           |
| 6       | Moju-1         | 0         | 3         | Profil de référence → WRB |
| 7       |                | 10        | 20        |                           |
| 8       |                | 35        | 45        |                           |
| 9       |                | 55        | 65        |                           |
| 10      |                | 105       | 115       |                           |
| 11      | Moju-2         | 0         | 5         | Profil de référence → WRB |
| 12      |                | 10        | 15        |                           |
| 13      |                | 25        | 35        |                           |
| 14      |                | 70        | 80        |                           |
| 15      |                | 115       | 125       |                           |

### Prélèvements au sein des fosses avec un cylindre de 250 cm<sup>3</sup>, pour mesurer la densité apparente

| Id labo | Site           | Prof. Min | Prof. Max | Commentaires  |
|---------|----------------|-----------|-----------|---|
| 16      | Cikel-Ecosilva | 0         | 5         | Mesure de la densité apparente (V=250 cm <sup>3</sup> ) |
| 17      |                | 5         | 10        |   |
| 18      |                | 20        | 25        |   |
| 19      |                | 35        | 40        |   |
| 20      |                | 50        | 55        |   |
| 21      | Moju-1         | 0         | 5         | Mesure de la densité apparente (V=250 cm <sup>3</sup> ) |
| 22      |                | 5         | 10        |   |
| 23      |                | 15        | 20        |   |
| 24      |                | 30        | 35        |   |
| 25      |                | 50        | 55        |   |
| 26      | Moju-2         | 75        | 80        | Mesure de la densité apparente (V=250 cm <sup>3</sup> ) |
| 27      |                | 0         | 5         |   |
| 28      |                | 10        | 15        |   |
| 29      |                | 20        | 25        |   |
| 30      |                | 40        | 45        |   |

### Prélèvements d'échantillons composites de surface 0-20 cm avec tarière (protocole GUYAFOR) pour étude des relations sol-végétation

| Id labo | Site       | Prof. Min | Prof. Max | Commentaires   |
|---------|------------|-----------|-----------|--|
| 31      | Ecosilva-1 | 0         | 20        | 4 prélèvements élémentaires sur 10 influencés par termitières<br>Echantillon composite séparé en deux sous-échantillons, l'un pour analyse par Cirad, l'autre pour analyse par Embrapa |
| 32      | Ecosilva-2 | 0         | 20        | 2 prélèvements élémentaires sur 10 influencés par termitières<br>Analyse par Cirad   |
| 33      | Ecosilva-3 | 0         | 20        | N prélèvements élémentaires sur 10 influencés par termitières<br>Analyse par Cirad   |
| 34      | Moju-2     | 0         | 20        | N prélèvements élémentaires sur 10 influencés par termitières<br>Echantillon composite séparé en deux sous-échantillons, l'un pour analyse par Cirad, l'autre pour analyse par Embrapa |